

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
Направление подготовки 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств  
Отделение автоматизации и робототехники

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Разработка устройства для сбора и предобработки вибросигналов на базе микропроцессорного контроллера</b>

УДК 004.415.2:004.31:62-868.7

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ61	Марукян Ваник Мурадович		

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ВКР, профессор-консультант ОАР ИШИТР	Гончаров Валерий Иванович	д.т.н.		
Руководитель ООП, доцент ОАР ИШИТР	Суходоев Михаил Сергеевич	к.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Верховская Марина Витальевна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ИШХБМТ	Невский Егор Сергеевич	-		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Леонов Сергей Владимирович	к.т.н.		

Томск – 2018 г.

## Планируемые результаты обучения

Код рез-та	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные</i>	
P1	Применять глубокие естественно-научные, математические знания в области анализа, синтеза и проектирования для решения научных и инженерных задач производства и эксплуатации автоматизированных систем, включая подсистемы управления и их программное обеспечение.
P2	Воспринимать, обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области теории, проектирования, производства и эксплуатации автоматизированных систем, принимать участие в командах по разработке и эксплуатации таких устройств и подсистем.
P3	Применять и интегрировать полученные знания для решения инженерных задач при разработке, производстве и эксплуатации современных автоматизированных систем и подсистем (в том числе интеллектуальных) с использованием технологий машинного обучения, современных инструментальных и программных средств.
P4	Определять, систематизировать и получать необходимую информацию в области проектирования, производства, исследований и эксплуатации автоматизированных систем, устройств и подсистем.
P5	Планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования для целей проектирования, производства и эксплуатации систем управления технологическим процессом и подсистем (в том числе интеллектуальных) с использованием передового отечественного и зарубежного опыта, уметь критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы.
P6	Понимать используемые современные методы, алгоритмы, модели и технические решения в автоматизированных системах и знать области их применения, в том числе в составе безлюдного производства.
<i>Универсальные</i>	
P7	Эффективно работать в профессиональной деятельности индивидуально и в качестве члена команды.
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий
P9	Проявлять широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, демонстрировать понимание вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду
P10	Следовать кодексу профессиональной этики и ответственности и международным нормам инженерной деятельности
P11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
Направление подготовки 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств  
Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
(Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
8ТМ61	Марукян Ваник Мурадович

Тема работы:

Разработка устройства для сбора и предобработки вибросигналов на базе микропроцессорного контроллера
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Устройство для сбора и предобработки виброакустических сигналов, реализованное на базе одноплатных микропроцессорных платформ, и апробация в лабораторных условиях. Назначением устройства является приём, преобразование, накопление, обработка и передача на ПК аналоговых сигналов напряжения, поступающих от пьезоэлектрические вибропреобразователей.</p>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Современные вычислительные устройства обработки сигналов: микропроцессоры, микроконтроллеры, сигнальные процессоры.</li> <li>2. Теоретические основы, алгоритмы и практические приложения цифровой обработки сигналов.</li> <li>3. Технология обработки цифровых сигналов в технических системах контроля и диагностики.</li> <li>4. Реализация устройств для сбора и предобработки сигналов на базе одноплатных микропроцессорных платформ.</li> <li>5. Проверка работоспособности созданных устройств в условиях лабораторного эксперимента.</li> <li>6. Подведение итогов исследовательской и конструкторской работы.</li> <li>7. Перевод на английский язык одного из разделов работы.</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b></p>	
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Основная часть</p>	<p>Гончаров Валерий Иванович</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Верховская Марина Витальевна</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Невский Егор Сергеевич</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>Accelerated FFT computation using of Raspberry Pi</p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	
--	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор-консультант ОАР	Гончаров Валерий Иванович	Д.Т.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8TM61	Марукян Ваник Мурадович		

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
Направление подготовки 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств  
Уровень образования – магистр  
Отделение автоматизации и робототехники  
Период выполнения – осенний/весенний семестр 2017/2018 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация
--------------------------

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
27.05.2018 г.	Основная часть	60
20.05.2018 г.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
20.05.2018 г.	Социальная ответственность	10
27.05.2018 г.	Обязательное приложение на иностранном языке	15

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор-консультант ОАР	Гончаров Валерий Иванович	д.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Леонов Сергей Владимирович	к.т.н.		

# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ТМ61	Марукян Ваник Мурадович

Инженерная школа информационных технологий и робототехники	Отделение школы (НОЦ)	Автоматизации и робототехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность
		Автоматизация технологических процессов и производств

## Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	1. РД 153-39-007-96
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	1. Налоговый кодекс Российской Федерации 2. ФЗ №212 от 24.07.2009 в ред. от 19.12.2016

## Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Оценка конкурентоспособности, рассмотрение альтернатив проведения научного исследования.
2. Разработка устава научно-технического проекта	Планирование этапов разработки программы, определение трудоемкости.
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Сравнительный анализ интегральных показателей эффективности, формирование бюджета НТИ
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Технико-экономическое обоснование проектируемой системы

## Перечень графического материала(с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. График проведения и бюджет НТИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ

## Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

## Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Верховская Марина Витальевна	к.э.н.		

## Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ61	Марукян Ваник Мурадович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8ТМ61	Марукян Ваник Мурадович

Инженерная школа информационных технологий и робототехники	Отделение школы (НОЦ)	Автоматизации и робототехники
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность
		Автоматизация технологических процессов и производств

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования и области его применения	Устройство для сбора и преобразования виброакустических сигналов, реализованное на базе одноплатных микропроцессорных платформ, и апробация в лабораторных условиях. Назначением устройства является приём, преобразование, накопление, обработка и передача на ПК аналоговых сигналов напряжения, поступающих от пьезоэлектрических преобразователей. Применяется в лабораторных экспериментах по диагностике двигателей внутреннего сгорания автомобилей, а также при решении задач определения положения трубопроводных утечек.
---	--

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность	Проблемы диагностики инженерных сетей; Эксплуатация литий-ионного аккумулятора (защита от перегрузки, перегрев, взрывоопасность, меры безопасности); Меры безопасности при работе с дисплеями.
2. Экологическая безопасность:	Решение по обеспечению экологической безопасности.
3. Обеспечение достоверности измерения:	Калибровка вибропреобразователей
4. Правовые вопросы обеспечения безопасности:	Особенности законодательного регулирования проектных решений.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	1.03.2018
--	-----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ИШХБМТ	Невский Егор Сергеевич	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ61	Марукян Ваник Мурадович		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 111 с. (без учета приложения), 45 рис., 17 табл., 46 источников, 1 прил.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, вибросигналы, п корреляционный анализ, микропроцессорный контроллер, Arduino, Raspberry Pi, оценка запаздывания прихода сигнала, вибродиагностика.

Объектом исследования является процесс реализации устройства приема и предобработки вибросигналов.

Цель работы – реализация устройства для приёма сигналов вибрации и их последующей передачи на персональный компьютер для дальнейшей обработки.

В процессе исследования проводились: рассмотрение современных технических областей приложения обнаружения сигналов и оценки их параметров, реализация алгоритмов цифровой обработки сигналов в одноплатных микропроцессорных платформах.

В результате исследования были получены результаты, подтверждающие возможность и целесообразность реализации устройства для сбора и предобработки вибросигналов.

Степень внедрения: практические результаты, полученные в данной работе могут использоваться в лабораторном учебном стенде оценки времени запаздывания сигнала.

Область применения: результат данной работы может быть использован при разработке корреляционных течеискателей в целях проведения вибродиагностики.

Экономическая эффективность/значимость работы данная работа является необходимым этапом разработки корреляционного течеискателя.

В будущем планируется совершенствование реализованного устройства путем добавлением блоков управления, а также в целях визуализации полученных результатов использование дисплея.



## **Обозначения и сокращения**

ПО – программное обеспечение;

ИИС – информационно-измерительная система;

АРМ – автоматизированное рабочее место;

ЦОС – цифровая обработка сигналов;

АЦП – аналогово-цифровое преобразование;

ЦАП – цифро-аналоговое преобразование;

ДПФ – дискретное преобразование Фурье;

БПФ – быстрое преобразование Фурье;

ЦСП – цифровой сигнальный процессор;

РВ – реальное время;

МП – микропроцессор;

## Оглавление

Введение.....	12
1. Устройства обработки цифровых сигналов в технических системах .....	13
1.1. Обработка сигналов в технических приложениях.....	13
1.1.1 Измерительные системы .....	14
1.1.2 Системы вибрационного контроля и диагностики.....	16
1.1.3 Системы радиолокации .....	18
1.1.4 Системы обработки речи.....	19
1.2 Алгоритмы цифровой обработки сигналов .....	20
1.2.1 Аналогово-цифровое преобразование .....	21
1.2.2 Цифро-аналоговое преобразование .....	23
1.2.3 Дискретное преобразование Фурье.....	26
1.2.4 Быстрое преобразование Фурье .....	29
1.2.5 Корреляционный анализ .....	32
1.2.6 Алгоритм оценки времени запаздывания.....	34
1.3 Вычислительные устройства обработки сигналов.....	37
1.3.1 Микропроцессоры общего назначения.....	37
1.3.2 Графические процессоры.....	38
1.3.3 Микроконтроллеры.....	40
1.3.4 Цифровые сигнальные процессоры .....	42
1.3.5 Одноплатные компьютеры .....	45
1.4 Аппаратное обеспечение виброакустических измерений.....	48
1.4.1 Измерение в системах реального времени .....	48
1.4.2 Виброакустические измерительные преобразователи.....	49
1.4.3 Устройства ввода аналоговых сигналов.....	51
1.4.4 Электронные устройства согласования .....	51
2. Программно-аппаратное решение устройств .....	54
2.1 Структура программно-аппаратных решений.....	54
2.1.1 Функциональная схема программно-аппаратного решения .....	54
2.1.2 Запись, хранение и передача вибросигналов .....	55
2.1.3 Программное обеспечение записи сигналов.....	57
2.1.4 Алгоритмы и программы обработки сигналов .....	58
2.2 Реализация на базе платформы Arduino.....	59
2.2.1 Платформа Arduino Uno .....	59

2.2.2	Платформа Arduino Mega.....	60
2.2.3	Плата расширения Music Shield VS1053b .....	61
2.2.4	Программное обеспечение.....	64
2.3	Реализация на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi.....	65
2.3.1	Особенности архитектуры компьютеров Raspberry Pi .....	65
2.3.2	Одноплатный компьютер Raspberry Pi B .....	66
2.3.3	Звуковая карта Wolfson Audio .....	67
2.3.4	Программное обеспечение.....	68
2.4	Апробация созданных устройств .....	69
2.4.1	Применение устройства на базе Arduino Mega.....	69
2.4.2	Применение устройства на базе Raspberry Pi .....	71
2.4.3	Учебный стенд для оценки времени запаздывания .....	77
3.	Социальная ответственность .....	79
4.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	88
	Заключение .....	104
	Список публикаций студента.....	105
	Список использованных источников .....	107
	Приложение А .....	107

## **Введение**

Обеспечение эффективной работы промышленных и энергетических предприятий с большим количеством разнообразного оборудования, значительная часть из которого функционирует в непрерывном технологическом цикле, во многом достигается внедрением системы оценки технического состояния и обслуживания механизмов и агрегатов, ориентированной на предотвращение аварийных ситуаций и своевременное проведение ремонтно-восстановительных работ[1].

Одним из наиболее информативных, но и достаточно сложных, параметров контроля для механизмов с вращательным движением является вибрация.

Вибродиагностика — метод неразрушающего контроля, основанный на анализе комплекса параметров вибрации для определения состояния оборудования

Однако решение задач вибрационной диагностики до настоящего времени остается весьма проблематичным, так как формулирование вывода о техническом состоянии объекта на основе количественных значений вибрационных параметров во многих случаях достаточно неоднозначно. Для более достоверных заключений представляется целесообразным проведение анализа динамики изменения непрерывных вибрационных сигналов, отражающих техническое состояние объекта на достаточно длительном временном интервале (минуты, часы и даже сутки).

Реализация устройств виброакустического контроля предполагает, как организацию каналов измерения акустических или вибросигналов, так и обеспечение возможности их цифровой обработки. Необходимо отметить, что, в ряде случаев, последняя задача требует существенных вычислительных мощностей и, следовательно, применение специальных вычислительных средств[2].

## **1. Устройства обработки цифровых сигналов в технических системах**

### **1.1.Обработка сигналов в технических приложениях**

Обработка цифровых сигналов лежит в основе многих продуктов и приложений, связанных с цифровой информацией, которые поддерживают существование информационного общества. Таким продуктам и приложениям часто приходится взаимодействовать с реально существующей информацией, иногда в реальном времени. Возможности методов цифровой обработки сигналов обрабатывать информацию в цифровом виде позволяют создавать доступные, технически прогрессивные продукты высокого качества для широкого потребительского рынка (смартфоны, аудиосистемы, цифровое телевидение, видеоигры и др.). Сильное влияние цифровой обработки сигналов заметно в таких областях, как[2]:

- медицина и здравоохранение (при наблюдении за пациентами в интенсивной терапии, в рентгеновских аппаратах, передовом кардиологическом оборудовании и системах составления карт мозговой деятельности);
- цифровые аудиосистемы (звуковые микшеры и электронная музыка);
- системы для персональных компьютеров (например, диски для хранения информации и коррекции ошибок, видео и звуковые карты).

Влияние цифровой обработки сигналов на повседневную жизнь человека, показано на рисунке 1[2].

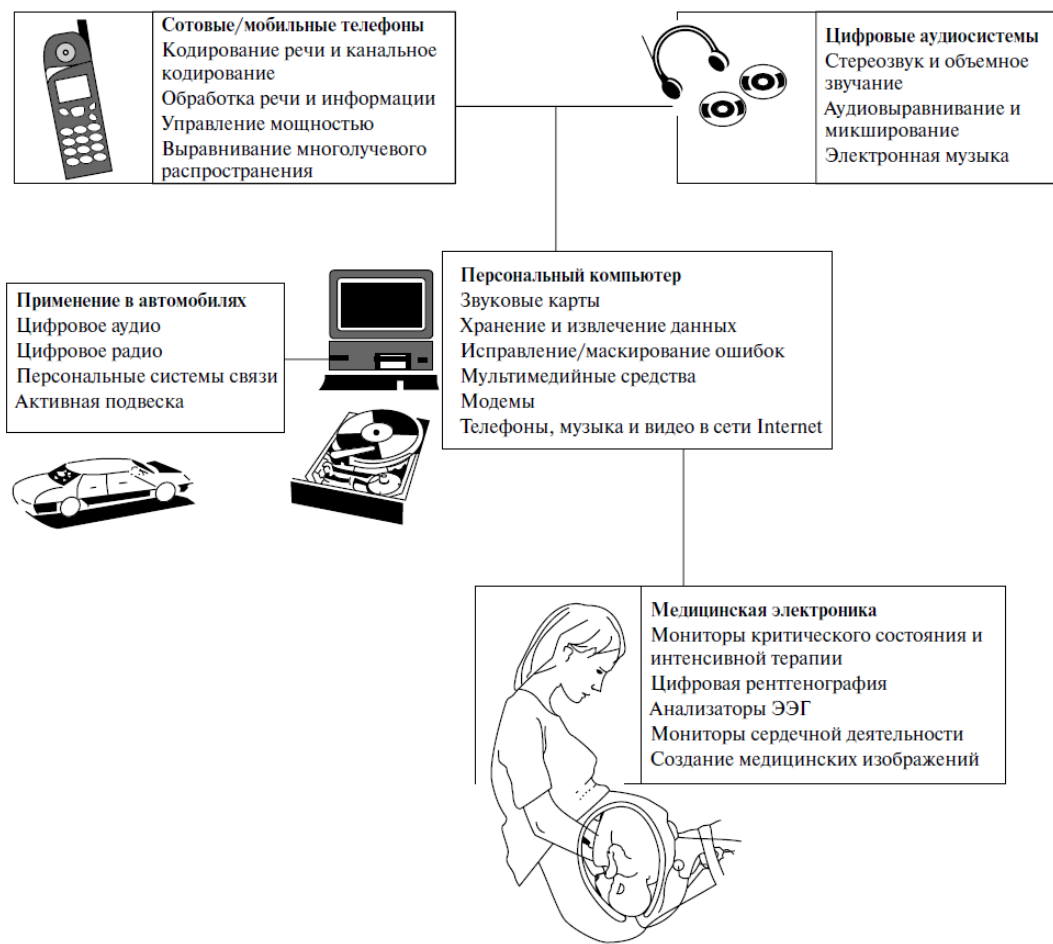


Рисунок 1 – Применение методов обработки сигналов в повседневной жизни человека

### 1.1.1 Измерительные системы

Процесс развития общества неотделим от становления все более полных и эффективных методов обработки информации. Каждая область науки и в большой степени различные отрасли деятельности (образование, экономика, экология, добывающие отрасли, транспорт, связь, медицинская диагностика, управление и т.д.) представляют собой совокупность методов, предназначенных для целенаправленной и эффективной обработки той информации, за которую ответственна определенная область[3].

Основу методов обработки информации составляют такие курсы, как теория информации, вычислительная математика и математическая статистика. Одна из задач курса состоит в том, чтобы за сложностью математических методов не потерять тот смысл, который заложен в современных принципах

обработки информации, и выделить те решения, которые используются на практике сегодня.

Под информацией подразумевается некоторая совокупность данных, представляющих интерес для человека или полезных для функционирования интеллектуальных систем. Практически всегда при сборе информации возникает потребность ее обработки.

Условие воздействия помех и отсутствия полной информации является чрезвычайно важным в проблеме понимания необходимости применения обработки, а, следовательно, и информационно-измерительных систем (ИИС). Информационно-измерительной системой (ИИС) называется совокупность функционально связанных устройств и программного обеспечения, которая реализует необходимое информационное обслуживание контролируемого объекта, включая автоматизированный сбор, представление, передачу, обработку и хранение измерительной информации.

При этом термины “сбор” и “измерительный” следует трактовать широко с включением процедур сканирования, оцифровки (сигналов и изображений), векторизации и т.д. Если передача данных осуществляется по кабельной линии или радиолинии, то система называется телеметрической или радиотелеметрической.

Информационно-измерительные системы применяют как автономно (сбор, обработка данных о движущихся объектах, внешней среде, биологических объектах), так и в составе различных автоматизированных комплексов, создаваемых в результате интеграции вычислительной и измерительной техники, устройств ввода-вывода и средств связи. Независимо от назначения и конкретного применения общее требование к ИИС состоит в том, чтобы исходная измерительная (чаще всего аналоговая) информация или сообщения, вводимые (принимаемые) в систему, могли быть восстановлены (или представлены) без искажений. Для большинства современных ИИС

обязательным также является требование передачи и обработки информации в реальном масштабе времени[3].

С учетом этого в зависимости от функционального назначения, то есть в зависимости от вида решаемых задач, ИИС подразделяются на следующие классы[7]:

- системы технической диагностики;
- системы идентификации;
- измерительные системы;
- статистические измерительные системы;
- системы распознавания образов;
- системы автоматического контроля.

### **1.1.2 Системы вибрационного контроля и диагностики**

Практически любое промышленное предприятие имеет парк критически важного вращающегося оборудования, отказы в работе которого оказывают значительное влияние на общую эффективность производства. Чем критичнее влияние установки на технологический процесс и чем серьезнее могут быть последствия аварии, тем точнее должны быть методы оценки фактического состояния ее ключевых узлов и механизмов. Одним из наиболее эффективных методов контроля технического состояния роторного оборудования является мониторинг и анализ параметров вибрации.

Эффективность методов вибрационного контроля и диагностики обусловлена, прежде всего, их высокой информационной емкостью, ведь даже малейшие неисправности роторного оборудования приводят к изменению вибрационных свойств.

Выполняя мониторинг и анализ параметров вибрации, можно выявить дефект на этапе зарождения и спрогнозировать наступление критических



изменений, когда оборудование должно быть выведено в ремонт. Это дает возможность заранее планировать выполнение ремонтных мероприятий, увеличить время непрерывной работы, сократить время восстановления работоспособности, повысить показатели технической готовности, использования и загрузки оборудования.

Важной опцией систем вибрационного контроля является диагностирование дефектов роторного оборудования. Для реализации этой функции требуется дополнительное программное обеспечение, позволяющее проводить более глубокий анализ вибрационных параметров[6].

Диагностирование дефектов роторного оборудования строится на спектральном анализе вибрационных сигналов, реже – с использованием вейвлет преобразований, кепстров и т.п. Для диагностирования дефектов на ранней стадии развития используются методики анализа сигналов вибрации в области высоких частот и их спектрального состава. При этом подавляют влияние низкочастотных составляющих, например, оборотной гармоник, для выделения слабых гармоник зарождающихся дефектов[6].

При возникновении дефекта возникает задача его быстрой и точной локализации, определение причин и формирования прогнозов развития. Эта задача решается с использованием средств и методов вибрационной диагностики.

Стационарные системы с функцией вибрационной диагностики традиционно включают в себя датчики измерения вибрации (нижний уровень), измерительные и коммуникационные модули (средний уровень), сервера сбора и обработки данных и АРМ специалистов (верхний уровень).

Контрольно-измерительное оборудование для систем вибрационного контроля подбирается с учетом конструкции, мощности, частоты вращения и других специфических характеристик агрегата. Основным источником первичных данных для системы являются датчики абсолютной и относительной вибрации. Для получения более полной картины о состоянии

эксплуатируемого оборудования в системах мониторинга могут быть использованы средства измерения температуры, тока, напряжения, давления и других параметров.

Средний уровень системы вибрационного мониторинга составляют станции сбора и обработки сигналов, осуществляющие обработку в режиме реального времени всех необходимых для оценки текущего состояния оборудования параметров, обеспечивающие своевременное формирование сигналов тревог, блокировок и защит и их передачу в системы автоматизированного управления и противоаварийной защиты[6].

### **1.1.3 Системы радиолокации**

За несколько последних десятилетий радиолокация превратилась в самостоятельное и развитое техническое направление. Поэтому довольно неожиданной оказалась наблюдавшаяся в последние годы значительная активность в создании новых радиолокационных систем и модернизации существующего оборудования. В немалой степени это связано с широким внедрением в радиолокационные системы методов цифровой обработки сигналов[5].

Обработка цифровых сигналов произвела революцию в трех областях радиолокации, которые относятся к основным проблемам[4]:

- приведение к лучшему определению расстояния до объекта без уменьшения рабочего диапазона с помощью сжатия импульса после приёма;
- фильтрация принятого сигнала в целях снижения шума (в результате увеличивается диапазон без снижения точности определения расстояния);
- быстрый выбор и генерация импульсов различной формы и длительности, что оптимизируя импульс для специфичных задач обнаружения.

После прихода алгоритмов цифровой обработки сигналов в радиолокацию потребовалось проектирование высокоскоростного оборудования и, как следствие, разработка эффективных алгоритмов[4].

#### 1.1.4 Системы обработки речи

Системы обработки речи используются для установления связи между человеком и устройством. Человек использует свои уши и рот, в частности, если заняты руки и глаза. Для генерации речи используются цифровая запись и имитация речевого тракта. При цифровой записи, речевой сигнал дискретизируется и хранится, обычно в сжатой форме. При воспроизведении записанные данные восстанавливаются и преобразуются в аналоговый сигнал. Данный подход является на сегодняшний день самым распространенным.[4]

Под распознаванием голоса подразумевается ввод информации в компьютер, который принимает и распознает человеческую речь. Методы распознавания голоса еще активно изучаются, так как поставленные задачи намного сложнее, чем при синтезе речи. В связи с этим успешные коммерческие системы распознавания речи немногочисленны. Работа таких систем зависит от стиля общения человека, использование пауз между словами, и от присутствия шумового фона. Двумя самыми важными операциями ЦОС в системах обработки речи являются извлечение параметров (создание эталонов) и подбор по образцу (сравнение эталонов с записями, хранящиеся в памяти). Блок-схема системы распознавания речи представлена на рисунке 2.

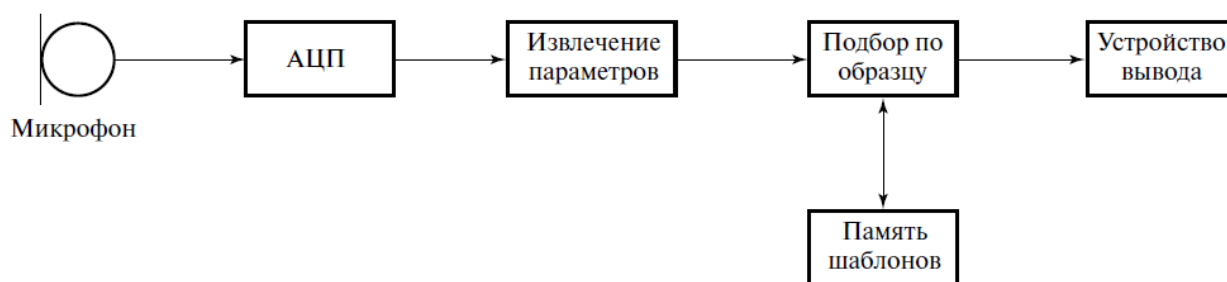


Рисунок 2 – Блок-схема системы распознавания речи

Для большинства людей разговор – естественная форма общения, ведь говорить намного быстрее, чем писать или печатать. Поэтому сейчас в офисах есть системы, которые позволяют управлять программами без использования рук. Системы распознавания слов встречаются в товарах широкого потребления (системы набора телефонного номера с речевым управлением), и в управляемых голосом предметах домашнего обихода для инвалидов с ограниченной способностью передвижения.

Существует множество возможных применений распознавания речи. Впрочем, дальнейшее развитие в этой области зависит, главным образом, от технологий искусственного интеллекта, поскольку машины должны не только распознавать, но и понимать человеческую речь[2].

## **1.2 Алгоритмы цифровой обработки сигналов**

Под сигналом понимается физический процесс (например, изменяющееся во времени напряжение), отображающий некоторую информацию или сообщение. В зависимости от функций, которые описывают все параметры сигнала, методы передачи данных могут быть аналоговыми, дискретными, цифровыми (способ, который является квантованным по уровню). Они используются для обеспечения работы многих электрических приборов[].

Цифровая обработка сигналов описывается дискретными функциями времени. Иначе говоря, амплитуда колебаний этого метода равна строго заданным значениям. Дискретные сигналы отличаются от аналоговых тем, что их значения известны лишь в дискретные моменты времени. Дискретные сигналы описываются решетчатыми функциями – последовательностями –  $X_D(nT)$ , где  $T = \text{const}$  – интервал (период) дискретизации,  $n=0,1,2,\dots$ . Сама функция  $X_D(nT)$  может в дискретные моменты принимать произвольные значения на некотором интервале. Эти значения функции называются выборками или отсчетами функции.

Основная функциональная схема систем ЦОС представлена на рисунке 3, в котором реальный аналоговый сигнал преобразуется в цифровой, на основе аппаратуры ЦОС в цифровых сигналах, и конвертируется обратно в аналоговый сигнал. Далее кратко рассмотрены основные алгоритмы цифровой обработки сигналов.

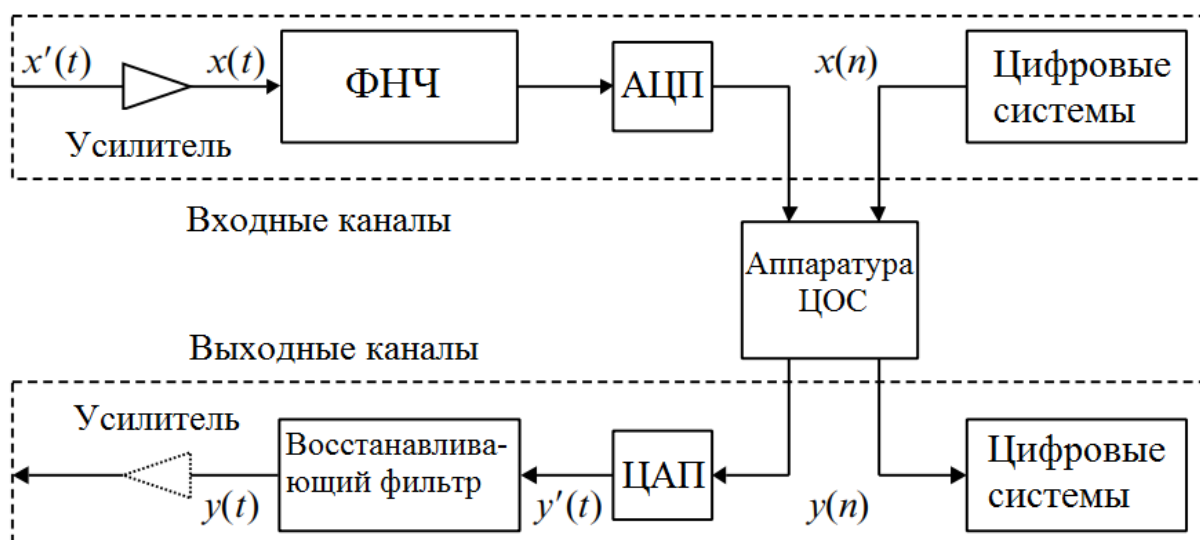


Рисунок 3 – Функциональная блок-схема системы ЦОС реального времени

### 1.2.1 Аналогово-цифровое преобразование

Прежде чем выполнять любой алгоритм цифровой обработки сигналов, последний необходимо представить в цифровом виде. Сигналы, существующие в природе, имеют аналоговый вид, поэтому необходим процесс преобразования в цифровой вид, который состоит из следующих этапов:

- сигнал (с ограниченной полосой) дискретизируется, т.е. аналоговый сигнал преобразуется в дискретный по времени сигнал с непрерывной амплитудой;
- амплитуда каждого дискретного элемента сигнала квантуется в один из  $2^B$  уровней, где  $B$  — число битов, которым дискретная выборка представлена в АЦП.

- дискретные уровни амплитуды представляются в виде различных бинарных слов длиной  $V$  бит.

Всего можно выделить три различных типа сигнала:

- аналоговый входной сигнал (непрерывный как по времени, так и по амплитуде);
- дискретный сигнал (непрерывен по амплитуде, но определяется только в дискретных точках во времени). Пример дискретного сигнала представлен на рисунке 4;
- цифровой сигнал  $x(n)$  ( $n = 0, 1, \dots$ ) существует только в дискретных точках во времени и в каждой временной точке может иметь одно из  $2^B$  значений (дискретный во времени сигнал с дискретной амплитудой).

Именно цифровой тип сигнала используется в цифровых устройствах обработки информации.

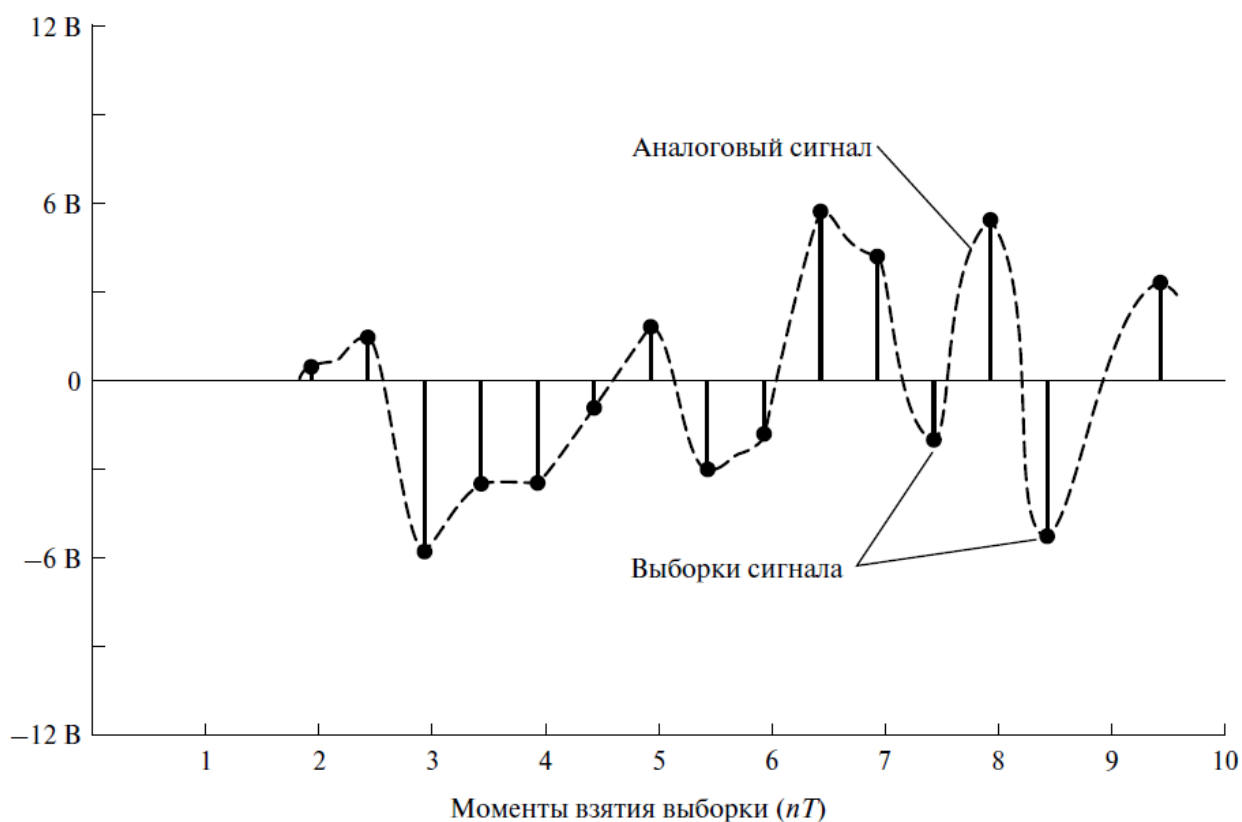


Рисунок 4 – Пример дискретного сигнала в случае идеальной дискретизации.

Заметим, что и дискретный во времени (т.е. дискретизованный сигнал), и цифровой сигнал можно передать в виде последовательности чисел  $x(nT)$ , или просто  $x(n)$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ )[2].

Аналоговый сигнал является непрерывной функцией времени, в АЦП он преобразуется в последовательность цифровых значений. Следовательно, необходимо определить частоту выборки цифровых значений из аналогового сигнала. Частотой дискретизации называют частоту, с которой производятся цифровые значения.

Непрерывно меняющийся сигнал с ограниченной спектральной полосой подвергается оцифровке, и исходный сигнал может быть точно восстановлен из дискретных во времени значений путём интерполяции. Точность восстановления ограничена ошибкой квантования. Однако в соответствии с теоремой Котельникова-Шеннона точное восстановление возможно, только если частота дискретизации выше, чем удвоенная максимальная частота в спектре сигнала.

Поскольку реальные АЦП не могут произвести аналого-цифровое преобразование мгновенно, входное аналоговое значение должно удерживаться постоянным, по крайней мере, от начала до конца процесса преобразования (этот интервал времени называют время преобразования). Эта задача решается путём использования специальной схемы на входе АЦП — устройства выборки-хранения — УВХ, который, как правило, хранит входное напряжение в конденсаторе, соединённом со входом через аналоговый ключ: при замыкании ключа происходит выборка входного сигнала (конденсатор заряжается до входного напряжения), при размыкании — хранение. Встроенное УВХ часто используется в АЦП, выполненных в виде интегральных микросхем[8].

### **1.2.2 Цифро-аналоговое преобразование**

Процесс цифроаналогового преобразования позволяет представить цифровой сигнал в аналоговой форме после его обработки, передачи или

хранения в цифровой форме. Такое преобразование необходимо, например, для генерации звукового сигнала, который передается в динамик, или озвучивания аварийного сигнала. Самое распространенное из используемых устройств ЦАП показано на рисунке 5.

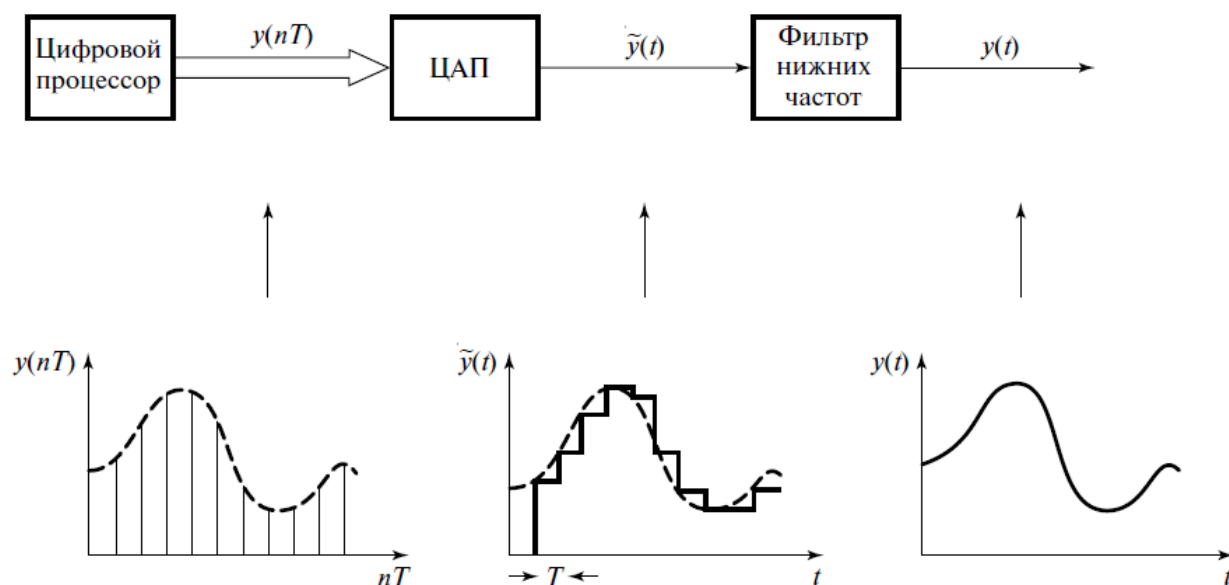


Рисунок 5 – Процесс цифроаналогового преобразования, который используется для восстановления аналогового сигнала после цифровой обработки.

Из рисунка 5 видно, процесс состоит из двух главных элементов: ЦАП и фильтра нижних частот (ФНЧ), который иногда называют фильтром восстановления или интегрирующим фильтром. Заметим, что на вход ЦАП подается серия импульсов, тогда как выход ЦАП имеет форму лесенки, поскольку каждый импульс не изменяется на протяжении времени  $T(s)$

Стандартный ЦАП принимает параллельные цифровые данные и создает аналоговый выходной сигнал, являющийся функцией входного цифрового кода. Для буферизации входа ЦАП используется регистр, чтобы выход ЦАП оставался без изменений, пока ЦАП принимает следующую порцию цифрового входа. Регистр может быть внешним по отношению к ЦАП или являться частью чипа ЦАП, как на рисунке 6. При сравнении его выхода  $\tilde{y}(t)$  и входа  $y(nT)$  становится очевидно, что для каждого цифрового кода, вводимого в ЦАП,



его выход задерживается на время  $T$ . В результате получается ступенчатая выходная характеристика ЦАП. В частотных координатах задерживающее действие ЦАП вносит некоторое искажение, известное как искажение по закону  $\sin x/x$ , или апертурное искажение, где  $x = \omega T/2$ .

На рисунке 6 показаны входной и выходной сигналы ЦАП с задержкой нулевого порядка в частотных и временных координатах, позволяющее сделать следующие выводы.

- Входной и выходной сигналы ЦАП имеют широкую полосу частот, каждая состоит из спектра оцифрованного сигнала плюс бесконечное число зеркальных изображений исходного спектра, центрированных на частотах, кратных частоте дискретизации.
- Амплитуда спектра выходного сигнала умножается на функцию  $\sin x/x$ , которая действует как фильтр нижних частот, значительно ослабляя зеркальные частоты.

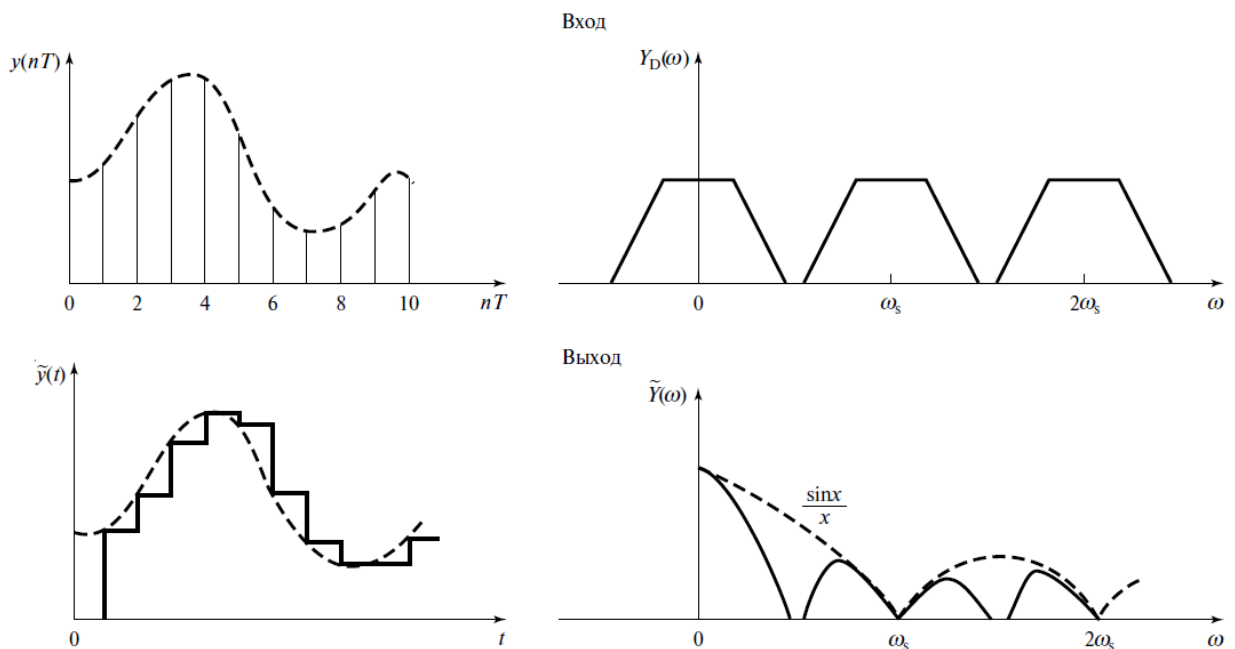


Рисунок 6 – Входной и выходной сигналы ЦАП в частотных и временных координатах.

Заметим, что изменение характеристики по закону  $\sin x/x$  можно представить гипотетическим фильтром нижних частот. Искажение по закону

$\sin x/x$  обусловлено задерживающим действием ЦАП, и при восстановлении сигнала оно является причиной амплитудного искажения. Среднюю ошибку, обусловленную этим действием, при заданной частоте можно выразить в процентном отношении:

$$\left(1 - \frac{\sin x}{x}\right) \cdot 100\%. \quad (1.1)$$

Для задержки нулевого порядка функция  $\sin x/x$  спадает приблизительно до 4 дБ на половине частоты дискретизации ( $F_s/2$ ), что дает среднюю ошибку приблизительно в 36,4%. Апертурную ошибку можно исключить с помощью выравнивания. На практике для этого сигнал до его преобразования в аналоговую форму пропускается через цифровой фильтр, амплитудно-частотная характеристика которого равна  $\sin x/x$ .

### 1.2.3 Дискретное преобразование Фурье

Спектральный анализ является одним из самых мощных инструментов обработки эксперимента. В частности, он используется для анализа данных, выявления характерных частот, в целях подавления шума и т.д. Математический смысл преобразования Фурье состоит в представлении сигнала  $y(x)$  в виде бесконечной суммы синусоид вида  $F(\omega) \cdot \sin(\omega x)$ . Функция  $F(\omega)$  называется преобразованием Фурье, или интегралом Фурье, или Фурье-спектром сигнала.

Дискретные преобразования Фурье (прямое и обратное) эквиваленты разложению функции в ряд, при замене интеграла его приближенными значениями, вычисленными по формуле прямоугольников [1].

Пусть сигнал  $x(t)$  наблюдается на отрезке  $[-T/2; T/2]$ . Формула прямого дискретного преобразования Фурье может быть получена путем замены интеграла суммой в соответствии с методом прямоугольников [1]:

$$d_n = \frac{1}{T} \sum_{k=-N/2}^{N/2} x\left(k \frac{T}{N}\right) \cdot e^{-i \frac{n \omega k T}{N}} \cdot \frac{T}{N}, \quad (1.2)$$

где  $N$  - количество временных отсчетов;  $T/N = T_0$  - интервал дискретизации. С учетом того, что  $\omega = 2\pi/T$ , выражение может быть переписано:

$$d_n = \frac{1}{N} \sum_{k=-N/2}^{N/2} x(kT_0) \cdot e^{-i \frac{2n\pi \cdot k}{N}}. \quad (1.3)$$

Если  $d_n = 0$  при  $|n| > N/2$ , обратная формула будет иметь вид:

$$x_k = x(kT_0) = \sum_{n=-N/2}^{N/2} d_n \cdot e^{i \frac{2n\pi \cdot k}{N}}. \quad (1.4)$$

Таким образом, (1.3) и (1.4) – прямое и обратное преобразования Фурье соответственно. Последовательность  $|d_n|$  называют амплитудным дискретным спектром временного ряда  $x_k$  [1].

Другой распространенной формой записи формул ДПФ является запись через поворачивающий множитель

$$W_N = e^{i \frac{2\pi}{N}}. \quad (1.5)$$

Используя (1.5), переписав (1.3) и (1.4), получим:

$$d_n = \frac{1}{N} \sum_{k=-N/2}^{N/2} d_k \cdot W_N^{-nk}, \quad (1.6)$$

$$x_k = \sum_{n=-N/2}^{N/2} d_n \cdot W_N^{nk}. \quad (1.7)$$

Несмотря на то, что дискретное преобразование Фурье связано с приближенным вычислением коэффициентов ряда Фурье, оно обладает свойством взаимной однозначности оригинала и образа. Среди других свойств дискретного преобразования Фурье –  $N$  периодичность последовательностей  $d_n$  и  $x_k$ , что позволяет производить в (1.3) и (1.4) суммирование по любым последовательным  $N$  отсчетам [1].

Преобразование Фурье для цифровых отсчетов сигнала называется *дискретным преобразованием Фурье* и записывается как:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-i \frac{2\pi}{T} kn} x(n) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[ \cos\left(\frac{2\pi}{T} kn\right) - i \sin\left(\frac{2\pi}{T} kn\right) \right] x(n). \quad (1.8)$$

Пример использования ДПФ приведен на рисунке 7. Здесь импульсная характеристика фильтра  $h(n)$ ,  $n = 0, 1, \dots, N - 1$ , с помощью ДПФ преобразуется в частотную[11].

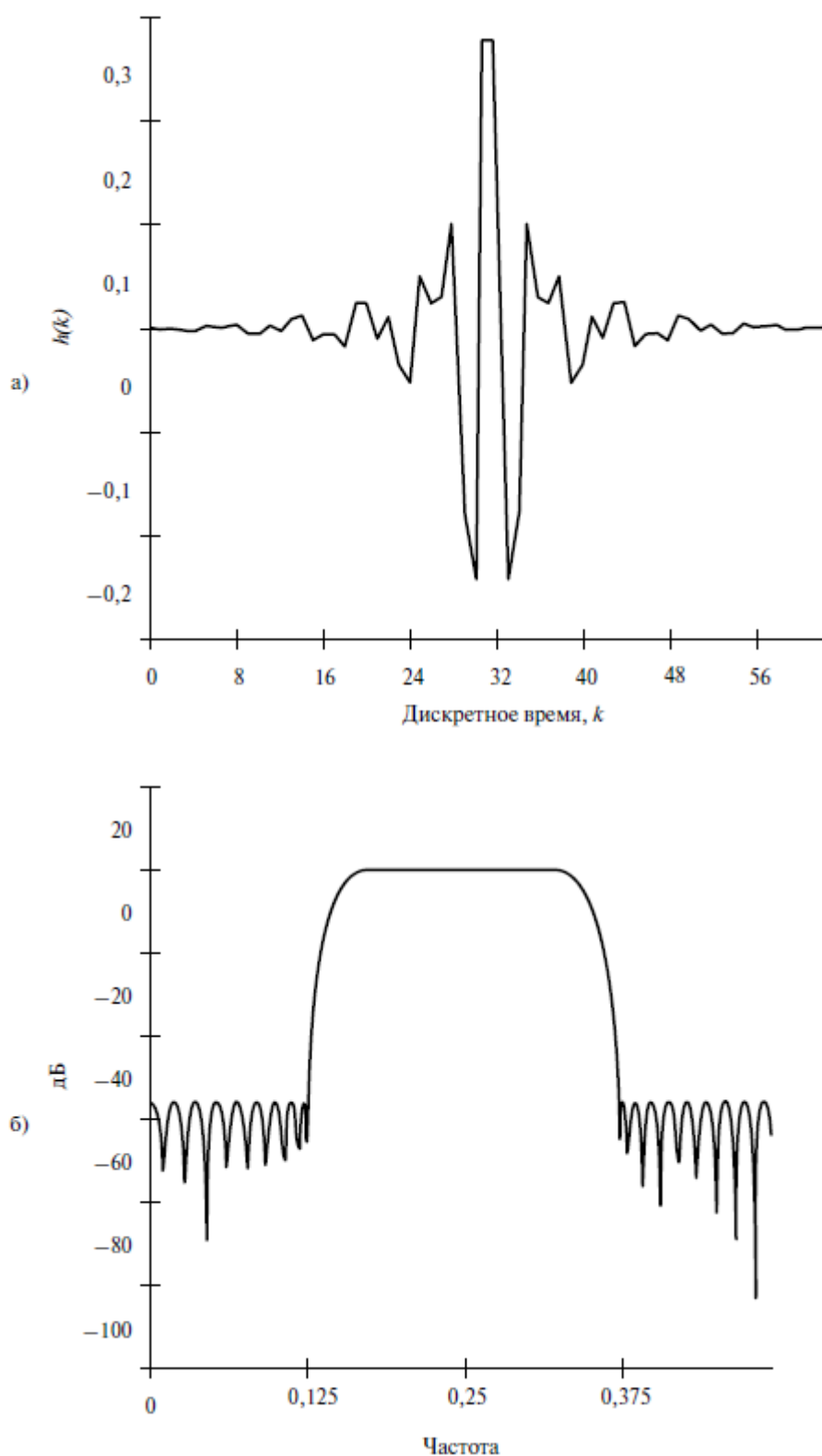


Рисунок 7 – Описание цифрового фильтра во временных и частотных координатах: а) импульсная характеристика; б) спектр фильтра. Спектр

фильтра был получен с помощью дискретного преобразования  $h(n)$ , что иллюстрирует одно из возможных применений ДПФ

Теперь рассмотрим, как изменились свойства дискретного преобразования Фурье по сравнению с прямым преобразованием Фурье на ограниченном интервале времени. При рассмотрении дискретизации аналогового сигнала, спектр входного сигнала должен быть ограничен по частоте. Несмотря на симметричность относительно 0 спектра сигнала для действительных отсчетов сигнала для положительных и отрицательных частот, отрицательные частоты могут потребоваться для некоторых алгоритмов работы со спектрами, к примеру, для алгоритма БПФ, рассмотренного далее [12,13].

#### 1.2.4 Быстрое преобразование Фурье

В связи с тем, что вычисление дискретного преобразования Фурье требует выполнения большого количества операций, широко используется более эффективный подход, получивший название быстрого преобразования Фурье (БПФ). В его основу положен эффективный алгоритм расчета следующей последовательности [10]:

$$A_n = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \cdot W_N^{-nk}. \quad (1.9)$$

С помощью (1.9) вычисление последовательности может быть сведено как прямое, так и обратное дискретное преобразование Фурье. Эффективная схема вычисления (1.9) реализуется через формулу Ланцоша – Даниэльсона [10]:

$$A_n = \begin{cases} A_n^0 + W_N^{-n} A_n^1, & 0 \leq n < M \\ A_{n'}^0 - W_N^{-n'} A_{n'}^1, & M \leq n < N \end{cases} \quad (1.10)$$

где  $N = 2M$ ,  $n' = n - M$ , а последовательности  $A_n^0, A_n^1$  могут быть вычислены по следующей формуле [10]

$$A_n^q = \sum_{k=0}^{M-1} a_{2k+q} W_N^{-nk}, \quad q = 0, 1. \quad (1.11)$$

С помощью (1.10) задача вычисления исходной последовательности упрощается, сведя задаче вычисления двух уменьшенных в два раза последовательностей, содержащих четные и нечетные члены исходной. Рекурсивное применение (1.10) в конечном итоге сводит к решению точечной последовательности к вычислению  $N$  одноточечных и следующим множеством этапов расчетов по (1.10). При этом в связи с  $A_n = a_k$ , вычисление одноточечной последовательности фактически не требуется.

В итоге, вычисление ДПФ по методу БПФ требует разбиения последовательности  $a_k$ , имеющей  $N = 2^r$  членов, на  $N$  одноточечных последовательностей. Для этого, требуется  $r$  последовательных делений  $a_k$  по (1.10). В таблице 1 смоделирована данная процедура для  $r = 3$  [2].

В таблице 2 показана взаимосвязь индексов всех элементов в исходном и конечном массивах. Из таблицы 2 заметим, что разбиение исходной последовательности на одноточечные в результате приводит к перестановке элементов. Далее происходят последовательные расчеты по (1.10) [2].

Таблица 1 – Разбиение исходной последовательности при  $N=8$

Исходная последовательность	Этап разбиения		
	Первый	Второй	Третий
$a_0$	$a_0$	$a_0$	$a_0$
$a_1$	$a_2$	$a_4$	$a_4$
$a_2$	$a_4$	$a_2$	$a_2$
$a_3$	$a_6$	$a_6$	$a_6$
$a_4$	$a_1$	$a_1$	$a_1$
$a_5$	$a_3$	$a_5$	$a_5$
$a_6$	$a_5$	$a_3$	$a_3$
$a_7$	$a_7$	$a_7$	$a_7$

Таблица 2 – Связь между индексами элементов

Элемент	Индекс в исходном массиве	Индекс в выходном массиве
$a_0$	000 (0)	000 (0)
$a_1$	001 (1)	100 (4)

$a_2$	010 (2)	010 (2)
$a_3$	011 (3)	110 (6)
$a_4$	100 (4)	001 (1)
$a_5$	101 (5)	101 (5)
$a_6$	110 (6)	011 (3)
$a_7$	111 (7)	111 (7)

В связи со спецификой многих задач, в которых предполагаются все элементы  $a_k$  вещественными, полного объема вычислений по (1.10) не требуется. Наиболее известным алгоритмом быстрого преобразования Фурье, предназначенным для решения указанных задач, является алгоритм Кули – Тьюки (алгоритм «бабочка»). Данный алгоритм отличается наглядностью (несложно осуществить графическое изображение схемы производимых вычислений), простота и достаточно высокое быстродействие[2].

Отдельного внимания также заслуживают структура и смысловая нагрузка данных на входе и выходе БПФ. Наибольший интерес с точки зрения практики представляет БПФ, основанное на алгоритме Кули-Тьюки, описанном выше и применимое для преобразования массива содержащего вещественные элементы. На входе БПФ имеется массив размерностью  $N = 2^r$ , где  $r$  – целое, содержащий вещественные числа. То есть количество элементов на входе БПФ должно быть кратно двум.

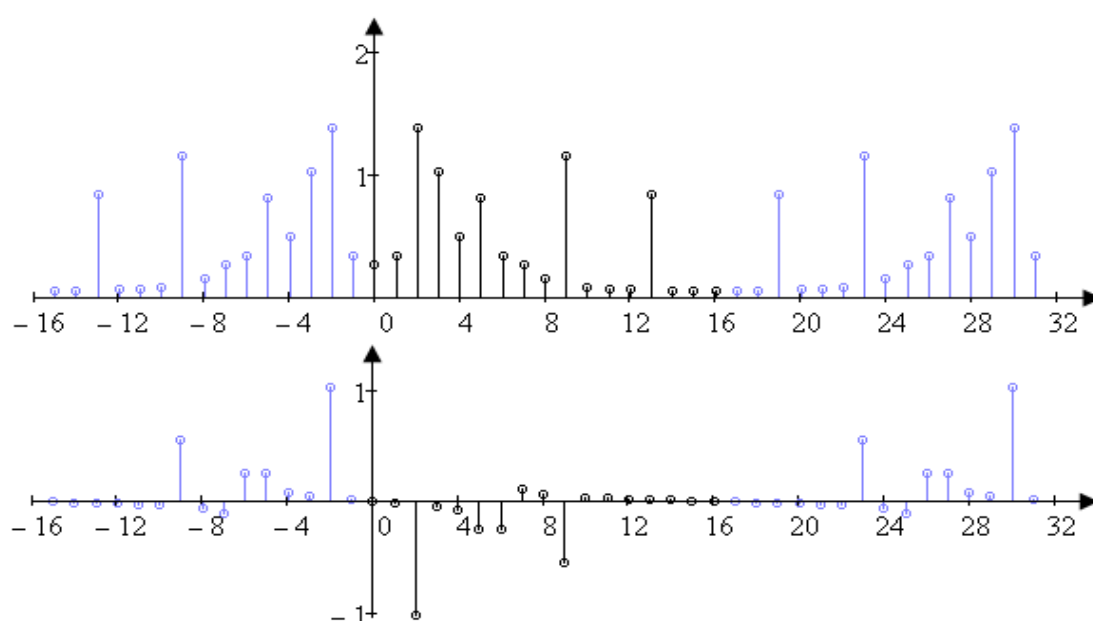


Рисунок 8 – Результат ДПФ (сверху – амплитудный спектр сигнала; снизу – мнимая составляющая комплексного спектра)

На выходе БПФ имеется массив, содержащий спектральные отсчеты, имеющие комплексные значения (несущие в себе информацию о значениях АЧХ и ФЧХ в ряде точек). В общем случае, размерность массива на выходе совпадает с размерностью на входе, однако с учетом того, что вход содержит лишь вещественные значения, выход БПФ будет иметь всего  $2^{r-1} + 1$  частотных отсчетов [2]. Опущенные частотные отсчеты будут являться комплексно сопряженными по отношению к уже имеющимся, то есть соответствовать отрицательным частотам. Данная ситуация проиллюстрирована на рисунке 1. Темным цветом выделены основные уникальные  $2^{r-1} + 1$  отсчета. Из рисунка 1 б видно, что период спектра состоит из 2 отсчетов не имеющих мнимой части (0 и  $2^{r-1}$ ),  $2^{r-1} - 1$  – комплексно сопряженных пар. Следовательно,  $2^{r-1} - 1$  отсчет, то есть по одному отсчету из каждой комплексно-сопряженной пары, могут быть отброшены, так как не несут уникальной информации.

### 1.2.5 Корреляционный анализ

Корреляционный анализ состоит в определении количественной меры сходства различных сигналов. Для определения сходства различных сигналов применяют корреляционные функции (КФ) [5,13].

КФ определяет меру сходства между сигналом  $S(t)$  и его копией, имеющей произвольную задержку на время. При увеличении величины перекрытия сигнала  $S(t)$  с его копией, увеличивается величина  $B_s(t_1)$  [9].

Свойства корреляционной функции:

1. При  $t_1 = 0$  значение корреляционной функции равняется энергии сигнала:



$$B_s(0) = \int_{-\infty}^{\infty} S^2(t)dt = E \quad (1.12)$$

2. Корреляционная функция является чётной функцией:

$$B_s(t_1) = B_s(-t_1) \quad (1.13)$$

3. Значение корреляционной функции при  $t_1 = 0$  является максимально-возможным.

4. С увеличением аргумента  $|t_1|$  значение корреляционной функции убывает

$$\lim_{t_1 \rightarrow \infty} B_s(t_1) = 0 \quad (1.14)$$

5. Если  $S(t)$  не имеет разрывов, то и  $B_s(t_1)$  является непрерывной.

Пример:

Рассмотрим корреляционную функцию прямоугольного импульса:

$$B_s(t_1) = \begin{cases} A^2 |T - t_1|, & |t_1| \leq T \\ 0, & |t_1| > T \end{cases} \quad (1.15)$$

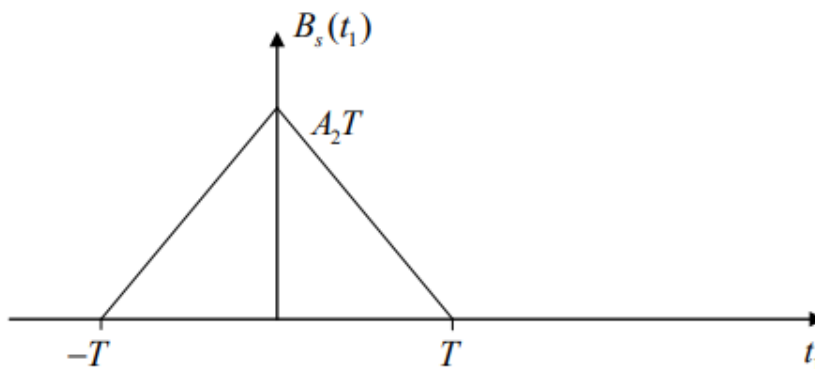


Рисунок 9 – Корреляционная функция прямоугольного импульса

Для периодического сигнала, когда энергия его не ограничена, требуется рассмотреть значение КФ при сдвиге копии сигнала лишь в пределах одного периода  $T$  исходного сигнала:

$$B_s(t_1) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t)S(t-t_1)dt \quad (1.16)$$

Поэтому свойства корреляционной функции несколько изменяются, а именно, значение  $B_s(0)$  определяет среднюю мощность сигнала:

$$B_s(0) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S^2(t) dt = P_{cp} \quad (\text{размерность } B^2). \quad (1.17)$$

### 1.2.6 Алгоритм оценки времени запаздывания

Рассмотрим измерение времени запаздывания в системе с разнесённым передатчиком и приёмником при условии, что излучаемый сигнал на приёмнике полностью известен, но неизвестно время запаздывания  $t_3$ . Тогда, модель принимаемого сигнала можно записать в виде[42]:

$$S_{t_3} = S(t - t_3) = au(t - t_3) \cos[\omega(t - t_3) - \varphi]. \quad (1.18)$$

Для поиска оценки максимального правдоподобия необходимо выявить функциональную зависимость компонента отношения правдоподобия от времени запаздывания. Энергия сигнала единичной амплитуды и спектральная плотность мощности шума  $N$  - фиксированные известные параметры. Амплитуда сигнала  $a$  принципиально зависит от расстояния между передатчиком и приёмником, определяющим время запаздывания  $t_3$ , но данной зависимостью можно пренебречь, в связи со слабой зависимости на интервале измерения  $t_3$ . В связи с тем, что угловое положение передатчика относительно приёмника может быть произвольным, то и уровень амплитуды сигнала произволен: т.е. параметр  $a$  неизвестная постоянная. Таким образом, от параметра  $t_3$  зависит только корреляционный интеграл[42]:

$$Z(t_3) = \int_{t_3}^{t_3+T} x(t)S(t - t_3)dt. \quad (1.19)$$

Отношение правдоподобия в параметризованном виде можно представить:

$$\lambda_x(t_3) = Ce^{\frac{2aZ(t_3)}{N}}, \text{ где } C = e^{\frac{\mathcal{E}_s a^2}{N}}. \quad (1.20)$$

Экспонента в (1.20) является монотонной функцией, поэтому максимум отношения правдоподобия наблюдается при том же значении  $t_3$ , при котором наблюдается и максимум корреляционного интеграла. Таким образом, оценка времени запаздывания по методу максимального правдоподобия требует максимизации корреляционного интеграла как функции  $t_3$ . Параметр  $t_3$  входит в пределы интегрирования корреляционного интеграла. На рисунке 10 представлен вариант схемы оценивания времени запаздывания сигнала. Устройство представляет набор вычислителей корреляционного интеграла, настроенных на различные значения задержки опорного сигнала  $t_{3i}$ , которые обеспечиваются линией задержки. Оценкой времени запаздывания сигнала  $t_3$  является значение задержки опорного сигнала в том канале, где корреляционный интеграл достигает максимума. Недостатком приведенной схемы является осуществление грубой оценки, с точностью до дискрета между опорными значениями задержек. Для уменьшения инструментальных ошибок можно уменьшить дискрет, т.е. увеличить число каналов.

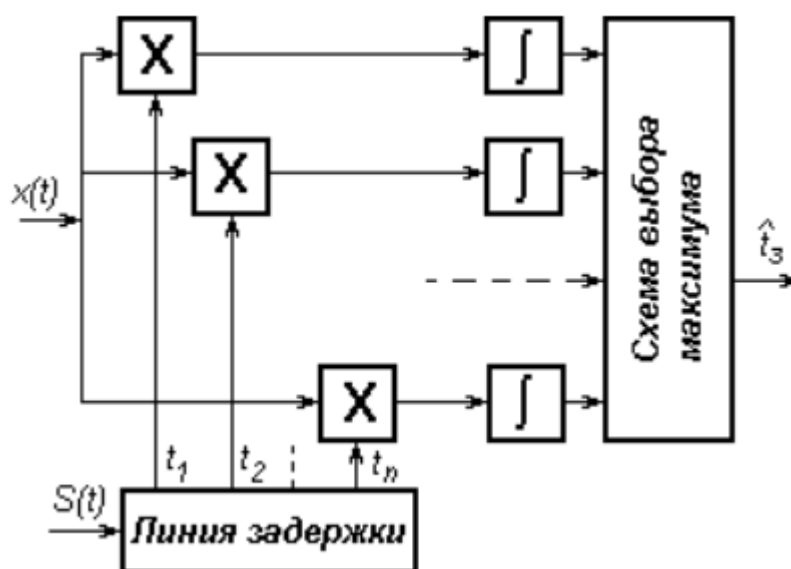


Рисунок 10 – Схема оценивания времени запаздывания сигнала

Более простой вариант устройства оценки времени запаздывания получается при использовании согласованного фильтра. Значение задержки сигнала фиксируется на временной оси. Момент времени, когда отклик на выходе согласованного фильтра достигает максимума, соответствует оценке

времени запаздывания сигнала. Необходимо только для получения оценки  $t_3$  вычесть время задержки сигнала в согласованном фильтре  $t_0$  (рисунок 11)[42].



Рисунок 11 – Упрощенная схема оценивания времени запаздывания сигнала

Построение схемы фиксации максимума также встречает ряд трудностей. Можно в районе максимума очень часто брать выборки и сравнивать величины напряжений. Точность оценки максимума будет связана с временным дискретом выборок. Технические трудности построения первой и второй схем оценивания  $t_3$  связаны с тем, что уравнение  $\frac{\partial \ln \lambda_x(t_3)}{\partial t_3}$  относительно параметра  $t_3$  неразрешимо и обладает особой спецификой - параметр  $t_3$  входит в пределы корреляционного интеграла. Под действием внутриприёмного шума временное положение максимума отклика на выходе согласованного фильтра смещается относительно истинного значения задержки (рисунок 12, пунктир).

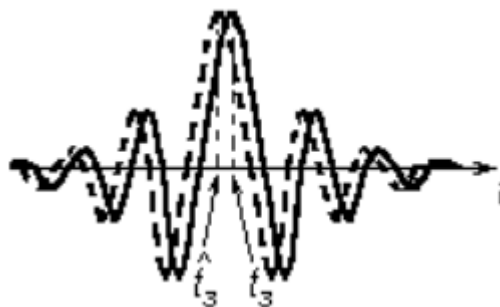


Рисунок 12 – Использование согласованного фильтра

Эти отклонения меняются от реализации к реализации. Дисперсия временного положения максимума отклика согласованного фильтра будет являться дисперсией оценки максимального правдоподобия[42].

### 1.3 Вычислительные устройства обработки сигналов

По функциональному признаку выделяют два класса МП: микропроцессоры общего назначения и специализированные микропроцессоры (рис. 8.2). Среди специализированных МП наиболее широкое распространение получили микроконтроллеры, предназначенные для выполнения функций управления различными объектами, и цифровые процессоры сигналов (DSP – Digital Signal Processor), которые ориентированы на реализацию процедур, обеспечивающих необходимое преобразование аналоговых сигналов, представленных в цифровой форме[14].

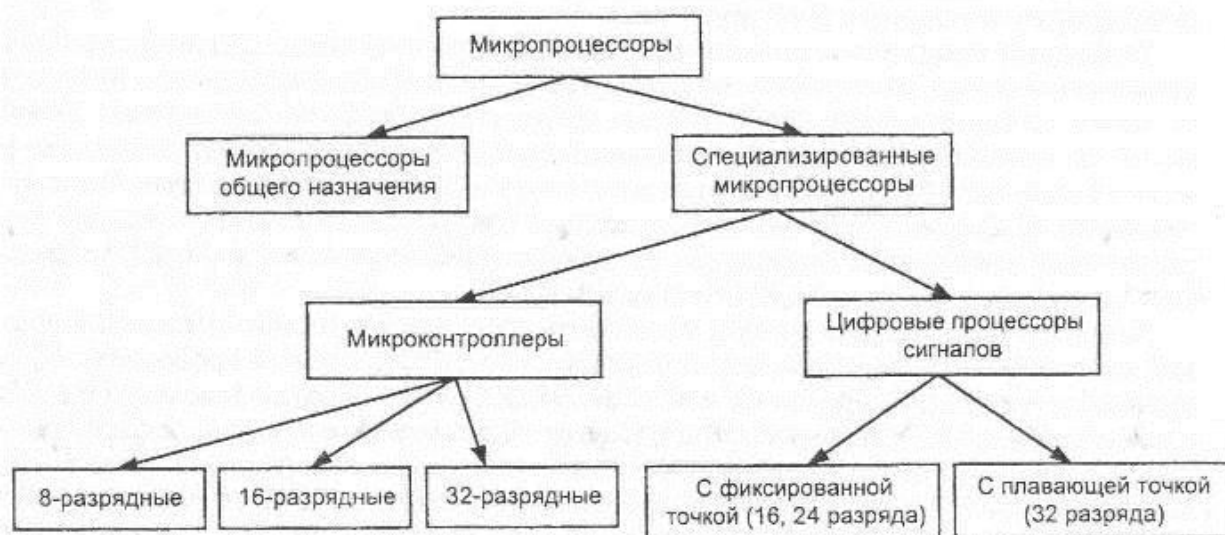


Рисунок 13 – Классификация современных микропроцессоров по функциональному признаку

#### 1.3.1 Микропроцессоры общего назначения

*Микропроцессоры общего назначения* предназначены для решения широкого круга задач обработки разнообразной информации. Их основной областью использования являются персональные компьютеры, рабочие станции, серверы и другие цифровые системы массового применения. К этому классу относятся CISC-процессоры Pentium компании «Intel», K7 - компании «Advanced MicroDevices» (AMD), 880x0 - компаний «Motorola», RISC-процессоры PoverPC, выпускаемые компаниями «Motorola» и IBM, SPARC -

компании «Sun Microsystems» и ряд других изделий различных производителей. Расширение области применения таких МП достигается главным образом путем роста производительности, благодаря чему увеличивается круг задач, который можно решать с их использованием. Поэтому повышение производительности является магистральным направлением развития этого класса МП. Обычно это 32-разрядные МП (некоторые МП этого класса имеют 64-разрядную или 128-разрядную структуру), которые изготавливаются по самой современной промышленной технологии, обеспечивающей максимальную частоту функционирования. Практически все современные МП этого класса используют Гарвардскую внутреннюю архитектуру, где разделение потоков команд и данных реализуется с помощью отдельных блоков кэш-памяти. В большинстве случаев они имеют суперскалярную структуру с несколькими исполнительными конвейерами (до 10 в современных моделях), которые содержат до 20 ступеней[14].

### **1.3.2 Графические процессоры**

Графический процессор (Graphics Processing Unit) предназначен исключительно для операций по обработке графики и вычислений с плавающей точкой. Он в первую очередь существует для того, чтобы облегчить работу основного процессора, когда дело касается ресурсоемких игр или приложений с 3D-графикой[26].

Высокая вычислительная мощность GPU объясняется особенностями архитектуры. Современные CPU содержат несколько ядер, тогда как графический процессор изначально создавался как многопоточная структура с множеством ядер. Разница в архитектуре обуславливает и разницу в принципах работы. Если архитектура CPU предполагает последовательную обработку информации, то GPU исторически предназначался для обработки компьютерной графики, поэтому рассчитан на массивно параллельные вычисления[27].

Каждая из этих двух архитектур имеет свои достоинства. CPU лучше работает с последовательными задачами. При большом объеме обрабатываемой информации очевидное преимущество имеет GPU. Условие только одно — в задаче должен наблюдаться параллелизм.

Графические процессоры уже достигли той точки развития, когда многие практические вычислительные задачи могут с легкостью решаться с их помощью, причем быстрее, чем на многоядерных системах. Будущие вычислительные архитектуры станут гибридными системами с графическими процессорами, состоящими из параллельных ядер и работающими в связке с многоядерными ЦП[28]

**Конвейерная архитектура (pipelining)** была введена в центральный процессор с целью повышения быстродействия последнего. Обычно для выполнения каждой команды требуется осуществить некоторое количество однотипных операций. Каждую из этих операций сопоставляют одной ступени конвейера[29].



## Рисунок 14 – Упрощенная модель работы конвейера

Современные процессоры выполняют обработку данных конвейерным методом, т.е. в процессоре на различных стадиях одновременно происходит исполнение нескольких команд – первая команда близка к исполнению, вторая в процессе исполнения и третья поступила на вход конвейера. Пример модели из применяемых ранее в ПК конвейеров представлен на рисунке 14. Используя данный метод возможен значительный рост производительности, т.к. одновременно задействуются все части процессора (каждая часть процессора выполняет заданный ему объем работы). Количество стадий конвейера – число элементарных задач, на которые разбивается выполнение команды – на рисунке 14 выделена каждая стадия. Однако, если стадий мало, то страдает производительность и пропадает возможность использовать большие тактовые частоты. А при многочисленных стадиях возможность использовать более высокие частоты процессора появляется, но при этом увеличиваются задержки в процессе исполнения команд. Таким образом, производители процессоров используют оптимальное количество стадий конвейера, при котором процессор показывает наивысшую производительность. Во время работы конвейера может возникнуть проблема, в связи с исполнением командами условных переходов (ветвления): если в процессор поступила команда условного перехода, то ответ на вопрос о порядке исполнения следующих команд будет известен только после исполнения команды ветвления. В это время могли бы поступить другие команды, которые бы постепенно исполнялись. Таким образом получается неэффективное исполнение команды ветвления, простаивание конвейера. И чем длиннее конвейер, тем дольше он простаивает[29].

### 1.3.3 Микроконтроллеры

Класс микропроцессоров, которые называются *микроконтроллерами*, ориентирован на управление объектами в реальном масштабе времени. Это



один из наиболее широких классов микропроцессоров, обладающих наибольшей специализацией, разнообразием функций и параметров, разнообразием различных периферийных устройств. Вычислительные требования, предъявляемые к микроконтроллерам, зачастую достаточно скромны. Микроконтроллеры широко применяют в качестве встроенных элементов в различные приборы[15].

Задачи управления некоторыми реальными объектами, например двигателями, требуют обработки сигналов и применения цифровых фильтров в цепях управления. Большие семейства ЦПОС различных фирм ориентированы на реализацию задач именно управления электроприводами. Примерами могут служить семейства TMS320C24xx фирмы TI, в основе которого лежит ядро ЦПОС C2000, встраиваемые контроллеры семейства ADMC3xx фирмы ADI, в основе которого лежит 16-разрядное ядро ADSP-2171, и некоторые другие[15].

Существует много задач, которые требуют сочетания возможностей решения классических задач ЦОС и задач управления. Примерами могут служить приборы мобильной телефонии, где требуется обработка голосовых сигналов и управление клавиатурой, дисплеем и т. д., задачи построения интеллектуальных кассовых аппаратов. Классические микроконтроллеры хорошо решают задачи управления и малоэффективны в задачах ЦОС и соответственно наоборот. Поэтому одним из методов решения подобных задач до недавнего времени было использование двух отдельных процессоров. В последнее время появились гибридные процессоры, объединяющие в одном кристалле возможности микроконтроллера и ЦПОС.

На данный момент существует большое количество различных типов архитектур микропроцессоров. Можно классифицировать их по-разному. Например, существуют микропроцессоры с RISC (Reduce Instruction Set Computer) архитектурой и с CISC (Complete Instruction Set Computer) архитектурой. В первом случае система содержит уменьшенный набор команд

одинакового формата, а в другой характеризуется полным набором команд. Все эти команды рассчитываются исходя из одного такта процессора[16].

Другой критерий характеристики — разрядность процессора. Существуют микропроцессоры с фиксированной разрядностью и с наращиваемой разрядностью[16].

В настоящее время существует множество уже готовых контроллерных плат с размещенными на них микроконтроллерами и средствами загрузки программ. Такие платы предназначены как для оценки работы с микроконтроллером (оценочные платы), так могут работать и в рамках законченного устройства[30]. Наиболее популярные решения, базирующиеся на микроконтроллерах от известных производителей, являются[30,41]:

- STM8S-Discovery (официальная отладочная плата от STMicroelectronics с 8-разрядным микроконтроллером STM8S105C6T6);
- STM32VL-Discovery (мощная отладочная плата от ST имеет на борту программатор/отладчик ST-LINK и производительный 32-разрядный ARM-микроконтроллер STM32F100RBT);
- Arduino Uno R3 (плата из семейства Arduino, с встроенным микроконтроллером ATmega328 от Atmel);
- MSP430 LaunchPad (плата от Texas Instruments для быстрого знакомства с 16-разрядными микроконтроллерами MSP430).

#### **1.3.4 Цифровые сигнальные процессоры**

Цифровые сигнальные процессоры (ЦСП) – это класс микропроцессорных средств, аппаратно-программно ориентированных (оптимизированных) на задачах цифровой обработки сигналов[15]. Цифровые сигнальные процессоры являются также мощными ускорителями для персональных компьютеров (трёхмерная графика, мультимедийные приложения и др.)[17].

Цифровые сигнальные процессоры, классифицируются в несколько групп:

- без встроенных и со встроенными средствами аналого-цифрового интерфейса (гибридные ЦСП);
- универсальные и специализированные (аудио, видео, фурье–процессоры и др.);
- плавающей точкой (Floating Point) и с фиксированной точкой (Fixed Point), или поддерживающие оба типа арифметики;
- низкой, средней и высокой производительности с достаточно условными ее оценками и границами;
- разрядностью данных 16, 24, 32, 40, 64 бита и др. или оперирующие с данными различной длины.

Важной особенностью цифровых сигнальных процессоров относят:

- аппаратная реализация вычислительных операций;
- короткий командный цикл, равный для всех (большинства) команд;
- конвейерное выполнение команд;
- множество каналов и средств ввода-вывода;
- поддержка реального времени;
- независимость времени обработки от обрабатываемых данных;
- высокий уровень и программно- аппаратного распараллеливания;
- наличие специальных команд и режимов адресации[17].

Гарвардская архитектура цифровых сигнальных процессоров заключается в раздельной памяти команд (программ) и данных и, соответственно, в раздельных шинах команд и данных (рисунок 15), что допускает их одновременную выборку. Реально в ЦСП используется модифицированная гарвардская архитектура, допускающая частичное размещение констант в памяти команд[17].

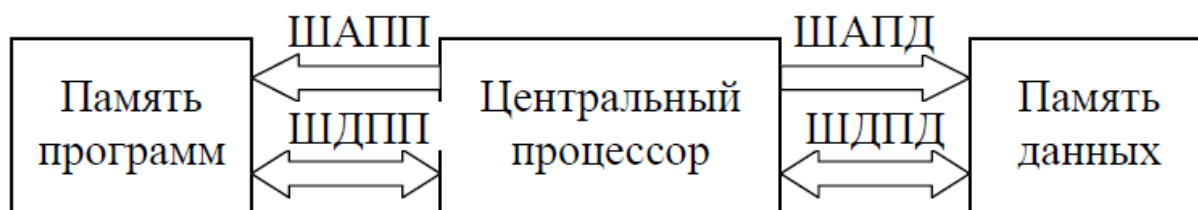


Рисунок 15 – Структура процессора на основе гарвардской архитектуры шины (ШАПП - шины адреса памяти программ и памяти данных (ШАПД); ШДПП - шины данных памяти программ и памяти данных (ШДПД))

Конвейерное выполнение команд заключается в одновременном выполнении двух и более команд на разных этапах: выборка команды, декодирование, выборка одного или одновременно двух операндов, исполнение.

С помощью специальных инструкций и режимов адресации обеспечивается эффективная реализация базовых алгоритмов ЦОС (цифровой фильтрации, корреляции, ДПФ, БПФ).

Структура сигнального процессора (рисунок 16), соответствующая модифицированной гарвардской архитектуре, отражает базовый состав его функциональных устройств, их связи и взаимодействие. Устройство управления программой осуществляет генерацию адреса памяти программ (команд), выборку команд, их дешифрацию, управляет вводом-выводом, прерываниями, пдп, периферийными модулями, размещенными на кристалле (таймеры, средства аналогового ввода-вывода и др.), вычислительными устройствами (алу, сдвигатель, умножитель-накопитель), выполняющими обработку данных и дополнительными функциональными модулями – сопроцессорами (цифровые фильтры, декодеры и др.). Устройство генерации адреса обеспечивает адресацию памяти данных. Межмодульные связи осуществляются по шинам адреса и данных памяти программ и памяти данных и шине управляющих сигналов (шу)[17].

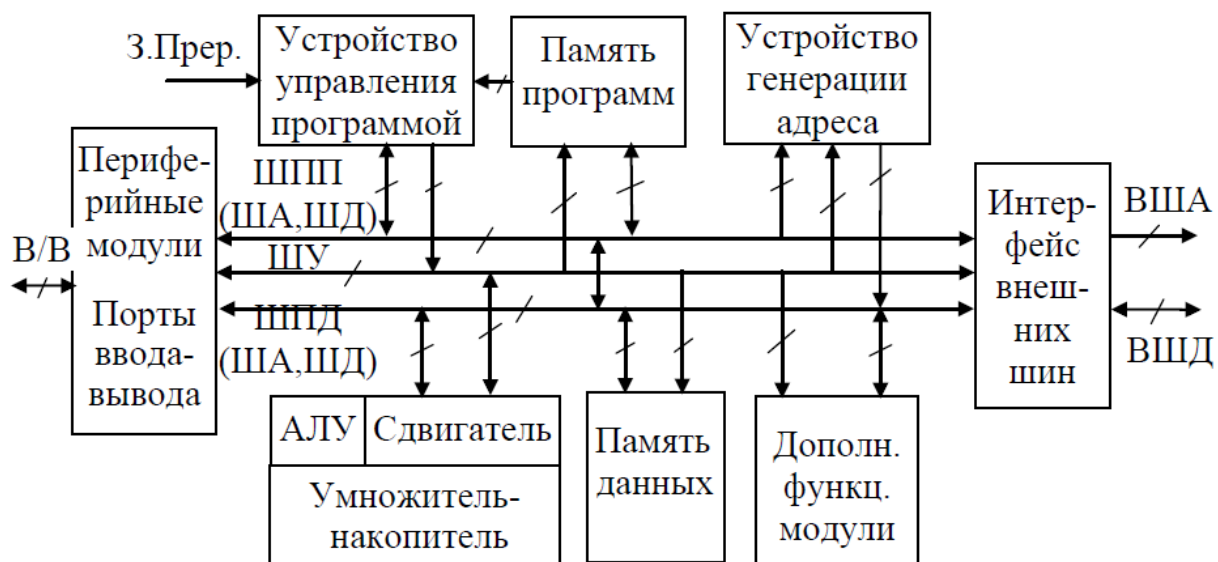


Рисунок 16 – Общая структура ЦСП

Структуры конкретных семейств ЦСП, отражая признаки базовой структуры, имеют свойственные каждому семейству архитектурные особенности.

### 1.3.5 Одноплатные компьютеры

С развитием технологий в области потребительской электроники одноплатные компьютеры стали довольно популярными среди пользователей и разработчиков[18].

Одноплатные компьютеры и процессорные модули могут предложить сходные возможности, предполагая при этом совершенно различные пути разработки для достижения требуемой производительности. Долгосрочное влияние принятого решения является существенным и связывает выбранный форм-фактор с жизненным циклом продукта. Выбор форм-фактора для создания системы может сильно ограничить требование по совместимости с существующими системами, в отличие от того, если бы система создавалась с чистого листа[19].

Одноплатный компьютер – это компьютер, построенный на одной печатной плате. Они просты и легки в дизайне. Они отлично подходят для клиентов, которым необходимо быстро выйти на рынок. В данный момент

имеется широкий выбор плат, от традиционного ATX / BTX (Extended Technology Extended / Balanced Technology Extended) до COM (компьютер на модуле), размеры которого составляют 58x65 мм. Производители одноплатных компьютеров часто предлагают индивидуальную настройку для очень небольших или не требующих единовременных инженерных затрат. Рассмотрим некоторые из плюсов и минусов использования одноплатных компьютеров[19].

*Преимущества использования одноплатных компьютеров:*

- простота в использовании (пропустите сотни страниц документов по проверке правил проектирования (DRC) и руководств по компоновке систем на процессорной плате);
- проверенное оборудование (сделать одну простую ошибку в дизайне платы на процессорном модуле может стоить очень дорого. Платы уменьшают этот риск);
- настраиваемый (возможность настройки платы означает, что вы платите за то, что вам нужно);
- единственный источник (спецификация простой платы на процессорном модуле все еще может быть в 100-х годах. Одноплатный компьютер упрощает логистику);
- время выхода на рынок (максимально быстрый выход продукции на рынок, чем для системы на процессорном модуле)[18].

*Недостатки использования одноплатного компьютера:*

- стоимость (если ваш продукт находится в категории с большим объемом информации, тогда может возникнуть больше смысла делать свой собственный дизайн и оправдывать затраты на разработку);
- гибкость (если необходимо много настроек на одноплатном компьютере, стоит рассмотреть вопрос о создании системы на процессорном модуле);

- жизненный цикл системы будет ограничен сроком производства конкретного одноплатного компьютера, используемого в этой системе (при его снятии с производства придется обновлять и свою систему с учетом отличий нового компьютера от устаревшего, например, иное расположение разъемов интерфейсов на плате компьютера)[18].

В данный момент есть некоторые известные одноплатные компьютеры, доступные на рынке как для разработки аппаратного, так и для программного обеспечения. Некоторые из них: Raspberry Pi, The Beagles (BeagleBoard, BeagleBoard xM, BeagleBone, BeagleBone Black), PandaBoard, MK802, MK808, Cubieboard, MarsBoard, Hackberry, Udoo и др.. Недавно Intel также вышла на рынок с открытым исходным кодом с его процессором Intel Atom на базе MinnowBoard[20].

Raspberry Pi - это одноплатный компьютер размером с кредитную карту, разработанный Raspberry Pi Foundation с целью обучения программированию и изучения базовой информатики школьникам со стоимостью всего 35 долларов. Микрокомпьютер работает на операционной системе Linux на процессоре ARM с тактовой частотой 700 МГц, имеет два USB-порта для подключения клавиатуры и мыши, поддерживает видеовыход через HDMI и/или композитный разъем RCA, имеет возможность подключения к Интернету с помощью разъема Ethernet и обладает пользовательской памятью на SD-карте[21].

Однако низкая стоимость Raspberry Pi привела к тому, что некоторые разработчики разработали несколько интересных проектов и осуществили его взлом. Также наличие контактов GPIO (General Purpose Input / Output) на плате заманило многих разработчиков, чтобы использовать их для нескольких физических вычислительных проектов, которые включают аппаратное взаимодействие электроники. Поскольку Raspberry Pi имеет открытый исходный код, он обладает огромными сообществами, поддерживающими его[20].

## **1.4 Аппаратное обеспечение виброакустических измерений**

### **1.4.1 Измерение в системах реального времени**

Системами реального времени называются автоматизированные системы с жесткими ограничениями на временные (динамические) характеристики работы.

Основное предназначение СРВ - взаимодействие с объектами реального мира в темпе процессов, протекающих в этих объектах. Большинство автоматизированных систем управления является СРВ, а среди автоматизированных информационных систем (АИС) такие системы встречаются редко. Иногда используются также термины: системы жесткого реального времени (СЖРВ) и системы мягкого реального времени (СМРВ)[22].

Программные системы реального времени (СРВ) находят все более широкое применение в сфере производства, на транспорте, в технических системах бытового назначения. Расширение практики применения СРВ сопровождается повышением требований к эффективности использования аппаратных ресурсов программными компонентами[23].

Обобщенная структура АСУ РВ представляют собой сложные программно-аппаратные комплексы, функционирующие на основе специализированных математических методов. Основными задачами, решаемыми типичной АСУ, являются[22]:

- сбор данных о состоянии и поведении управляемого объекта;
- преобразование, сохранение, отображение, передача и отображение данных;
- анализ данных и принятие решений;
- выдача управляющих воздействий на управляемый объект.



Обобщенная структура автоматизированной системы управления изображена на рисунке 17[22].

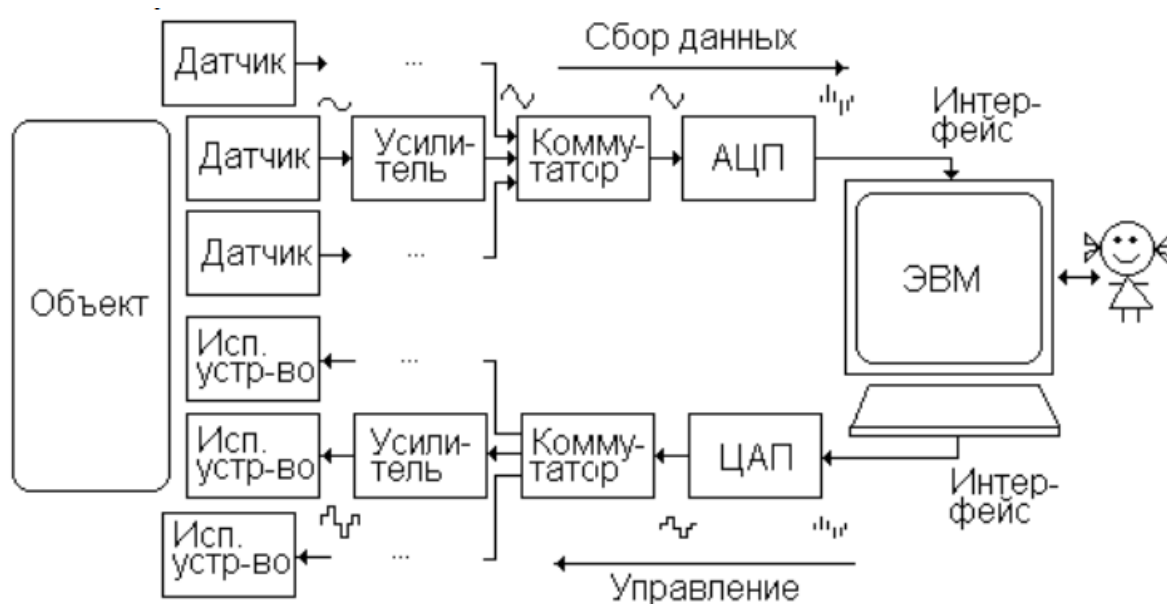


Рисунок 17 – Обобщенная структурная схема автоматизированной системы управления

На практике встречаются частные случаи данной структуры:

- при присутствии в системе только каналов сбора данных и измерений, то это ИИС – информационно-измерительная система;
- при принятии решений и осуществление управления непосредственно человеком, то это автоматизированная система диспетчерского управления (АСДУ).

#### 1.4.2 Виброакустические измерительные преобразователи

Эффективность метода корреляции для обнаружения утечки зависит от типа используемых виброизмерительных датчиков и их чувствительности. В качестве датчиков могут использоваться гидрофоны, геофоны и акселерометры.

Гидрофон (от греч. *hydor* - вода и *phone* - звук) – подводный электроакустический преобразователь для приёма акустических сигналов и шумов. По способу крепления гидрофоны классифицируются на два типа:

- врезной (используется для измерений путём врезки в стенку

герметичного сосуда или трубы);

- погружной (используется для измерения путём погружения в воду на кабеле).

Геофон – электроакустический преобразователь, предназначенный для приёма упругих волн, распространяющихся в земной коре. Однако, геофоны, как и погружные гидрофоны не лишены таких недостатков, как:

- влияние помех на сигнал от датчика до утечки (неоднородная почва / подземные течения);
- высокая цена;
- ограниченность некоторых геофонов по глубине обнаружения утечки;
- точность локализации утечки зависит от места установки датчика.

Однако наиболее широкое применение в рассматриваемой области находят виброизмерительные преобразователи, или виброакселерометры, т.к. они являются основными средствами измерения в системах поиска течи. Виброакселерометры – датчики генераторного типа, непосредственно преобразующие вибрационное или ударное ускорение в пропорциональный электрический сигнал. В отличие от предыдущих датчиков, виброакселерометры не имеют сложностей при монтаже и имеют более доступную цену.

Способ крепления акселерометра к объекту может существенно влиять на допустимый частотный диапазон вибрационных измерений. Лучшим способом крепления акселерометра к объекту считается резьбовой, при котором резонансная частота акселерометра практически не уменьшается. Однако данный способ не подходит для частых периодических измерений вибрации переносной системой мониторинга. При креплении на магнит резонанс датчика зависит от силы магнита и состояния контактной поверхности. Несмотря на столь низкий резонанс в задачах вибрационного мониторинга при таком креплении можно проводить относительные измерения вибрации и после резонанса на магните. При немагнитной поверхности допускается использование ручного щупа, однако стандартная конструкция такого щупа

максимально снижает резонансную частоту[43].

### **1.4.3 Устройства ввода аналоговых сигналов**

Устройства (модули) ввода-вывода являются интерфейсом между процессором и реальным миром. В идеальном случае было бы желательно иметь в процессоре значения измеренных сигналов в любой момент времени. Однако поскольку количество каналов ввода-вывода в некоторых системах может достигать тысяч, а измерительные каналы всегда имеют ограниченную пропускную способность, измеренные значения поступают в процессор в дискретные моменты времени[44].

Разнообразие физических явлений порождает разнообразие датчиков, для каждого из которых существует соответствующее устройство ввода. Для унификации (сокращения числа типов) модулей ввода используют устройства нормирования сигналов, которые преобразуют измеряемую физическую величину в стандартный электрический сигнал, соответствующий ГОСТ 26.011-80 и ГОСТ Р 51841-2001. Фактически в промышленной автоматизации используются следующие стандартные диапазоны аналоговых сигналов: 0...10 В, 0... ±10 В, 1...5 В и 4...20 мА, 0...20 мА. ГОСТ Р 51841-2001 не рекомендует применять диапазон 0...20 мА в новых разработках[45]. Входное сопротивление потенциальных входов должно быть не менее 10 кОм для диапазона 0...10 В и 0... ±10 В, не менее 5 кОм для диапазона 1...5 В и не более 300 Ом для диапазона 4...20 мА[44].

### **1.4.4 Электронные устройства согласования**

В устройствах очень часто возникает задача согласования уровня логических сигналов. Согласование уровня логических сигналов необходимо при следующих ситуациях[24]:

- выход микросхемы с меньшим напряжением питания подключен к входу микросхемы с большим напряжением питания;

- выход микросхемы с большим напряжением питания подключен к входу микросхемы с меньшим напряжением питания;
- оба случая объединены — двунаправленные сигнальные линии.

### Схемы согласования логических уровней

Задача согласования логических уровней микросхем может быть решена с помощью:

- оптопар;
- схем на дискретных элементах;
- операционных усилителей и компараторов;
- буферов с открытым стоком;
- специализированных микросхем-преобразователей уровней с двумя питающими напряжениями;
- микросхем совместимых с низкоуровневыми логическими сигналами;
- микросхем выдерживающих повышенные уровни сигналов.

Какой из этих способов применить в конкретной схеме, зависит от различных факторов, таких как: количество сигнальных линий, доступность элементной базы, размеры платы, стоимость разработки, частота сигналов и т.п. С точки зрения надежности наилучшим вариантом будет использование уже готовых решений, то есть специализированных микросхем-преобразователей[24].

Рассмотрим вариант схемы согласования на резистивном делителе напряжения с КМОП микросхемами с напряжением питания 3,3 и 5 вольт[25].

### Схема с делителем напряжения

В данной схеме высокое напряжение делится на делителе, рассчитанном так чтобы получить напряжение низковольтной части. Большая точность подбора номиналов не требуется: более высокое напряжение уйдёт в защитный диод (но номиналы резисторов не дадут ему пробиться), а более низкое по-прежнему будет детектироваться входной цепью[25].

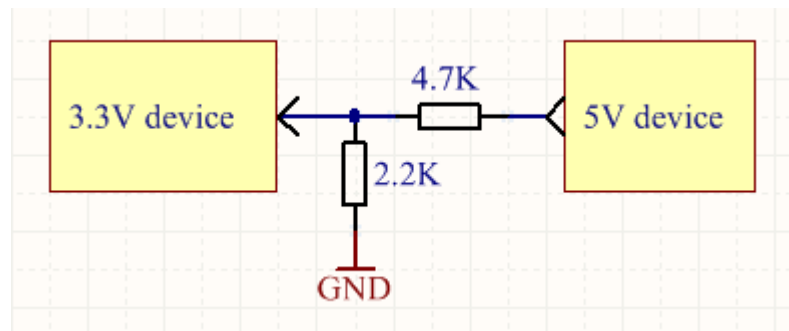


Рисунок 18 – Схема согласования сигналов на основе делителя напряжения

## **2. Программно-аппаратное решение устройств**

### **2.1 Структура программно-аппаратных решений**

Реализация устройств виброакустического контроля предполагает, как организацию каналов измерения акустических или вибросигналов, так и обеспечение возможности их цифровой обработки. Необходимо отметить, что, в ряде случаев, последняя задача требует существенных вычислительных мощностей и, следовательно, применение специальных вычислительных средств [2].

Далее рассмотрены основные этапы разработки программно-аппаратного решения на базе микропроцессорных платформ.

#### **2.1.1 Функциональная схема программно-аппаратного решения**

В качестве целевой платформы для реализации устройства необходим отладочный комплекс с установленным микропроцессором. Выбор обусловлен, прежде всего, широкой доступностью подобных плат и модулей расширения к ним, а также достаточными для решения задач приёма, хранения, передачи сигналов ресурсами.

Для приема и предварительной обработки сигналов необходимо предусмотреть специальный модуль расширения, позволяющий осуществлять подключение датчиков в целях снятия сигнала по двум каналам для последующей обработки на специальном оборудовании.

Таким образом, в реализации опытного образца устройства использованы следующие компоненты:

- микроконтроллерная плата;
- модуль расширения для звукозаписи;
- датчики вибрации;
- блок управления;
- согласующее устройство (усилитель);
- соединительные провода.

Функциональная схема программно-аппаратного решения представлена на рисунке 19.

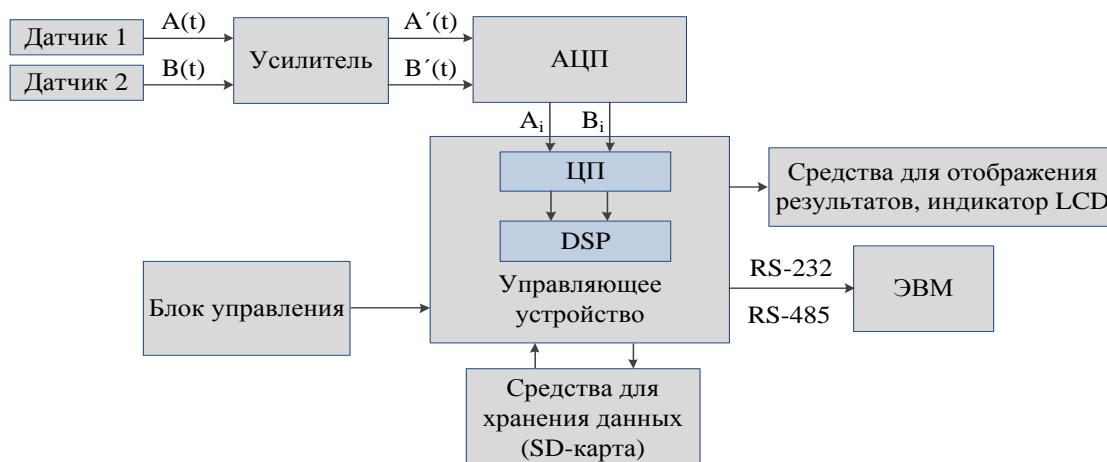


Рисунок 19 – Схема программно-аппаратного решения

Однако, в зависимости от выбора микропроцессорной платы, цифровая обработка вибрационных сигналов может производиться либо посредством передачи на персональный компьютер (средствами специального программного обеспечения и математических пакетов), либо непосредственно на самой плате при достаточных вычислительных мощностях.

Далее в разделах рассмотрены варианты реализации аппаратного решения на базе микропроцессорной платформы Arduino, и вариант реализации на базе одноплатного микрокомпьютера Raspberry Pi.

### 2.1.2 Запись, хранение и передача вибросигналов

Основным назначением устройства является запись сигналов, усиление и дальнейшая передача на персональный компьютер. При выборе платы расширения звукозаписи стоит обратить внимание на возможность двухканальной записи сигналов, а также поддержка записи формата .wav. Последнее условие обусловлено тем, что специальное программное обеспечение и математические пакеты совместимы с работой в формате .wav.

Записанные файлы сохраняются на micro-SD карту памяти, подключенной к одноплатному устройству в соответствующий разъем на плате. Затем файлы на SD-карте передаются на персональный компьютер в целях их дальнейшей обработки. В случае реализации устройства на базе Raspberry Pi обработка вибросигналов производится непосредственно на самой плате.

В качестве первичных преобразователей сигналов вибрации использованы пьезоэлектрические виброакселерометры российского производства ДН-4-М1. Недостатком виброакселерометра ДН-4-М1 является низкое значение коэффициента преобразования, обусловленное малыми габаритными размерами датчика. Последнее может быть компенсировано использованием устройств предварительного усиления сигналов. Преимуществами данного типа датчиков является широкий рабочий диапазон частот и невысокий относительный коэффициент поперечного преобразования, что обеспечивает удовлетворительное качество в нижней части слышимого диапазона. Последнего достаточно для решения широкого класса задач вибрационного контроля, в том числе диагностики двигателей внутреннего сгорания [35] и определения положения трубопроводных утечек [35]. Основные характеристики [37] датчиков ДН-4-М1 сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Основные характеристики преобразователей ДН-4-М1

Наименование характеристики	Значение
Рабочий диапазон частот, Гц	до 12600
Действительное значение коэффициента преобразования вибропреобразователя на частоте 160 Гц, $\text{мВ} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{м}^{-1}$	$1 \pm 0,06$
Относительный коэффициент поперечного преобразования, %	4
Средний срок службы, не менее, лет	10
Габаритные размеры, мм	20x20x14
Масса, не более, кг	0,013
Рабочий диапазон температур, °C	-30...+70
Способ монтажа	магнитный прижим



### **2.1.3 Программное обеспечение записи сигналов**

Разработанное программное обеспечение должно обеспечивать запись сигналов с датчиков, предварительную обработку полученных сигналов и сохранение данных на флэш-карте. После окончания записи сигналов, данные можно перенести на персональный компьютер для дальнейшей обработки. Алгоритм разработанного программного обеспечения представлен на рисунке 20.

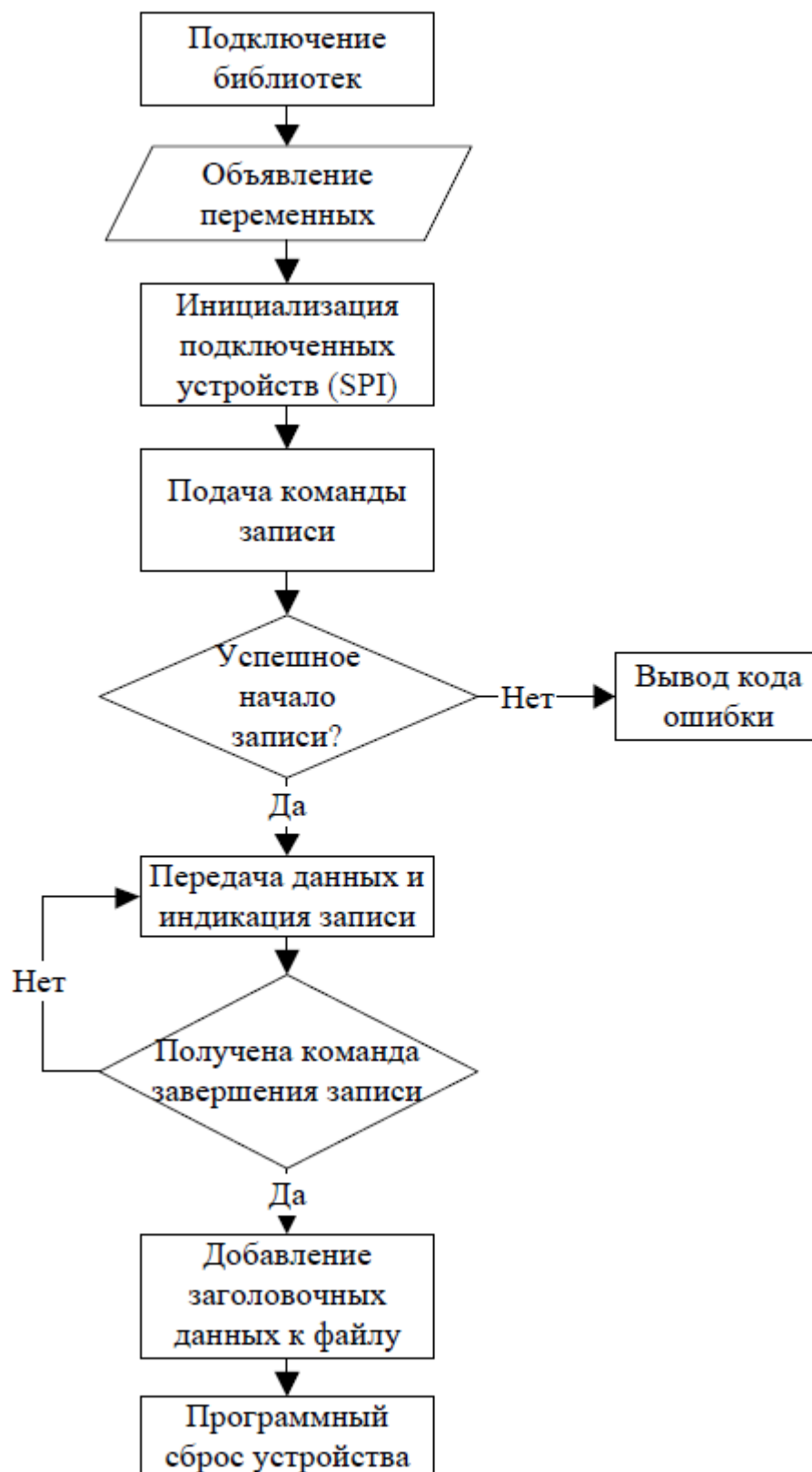


Рисунок 20 – Алгоритм разработанного программного обеспечения

#### 2.1.4 Алгоритмы и программы обработки сигналов

В компьютере осуществляется программная обработка полученных сигналов для получения временных и спектральных аналитических функций (в том числе, функций когерентности и кросскорреляции).

## 2.2 Реализация на базе платформы Arduino

При реализации решения с использованием платформы Arduino получаем простое устройство для приёма сигналов вибрации и их последующей передачи для дальнейшей обработки, средствами специального программного обеспечения и математических пакетов.

### 2.2.1 Платформа Arduino Uno

Arduino Uno основан на базе чипа ATmega328, разработанным компанией Atmel. Микроконтроллер имеет 6 аналоговых входов и 14 цифровых вход/выходов, кварцевый генератор, разъем ICSP, разъем USB и кнопку перезагрузки [4]. Внешний вид микроконтроллера представлен на рисунке 21. В таблице 4 представлены базовые характеристики контроллера Arduino Uno [4].

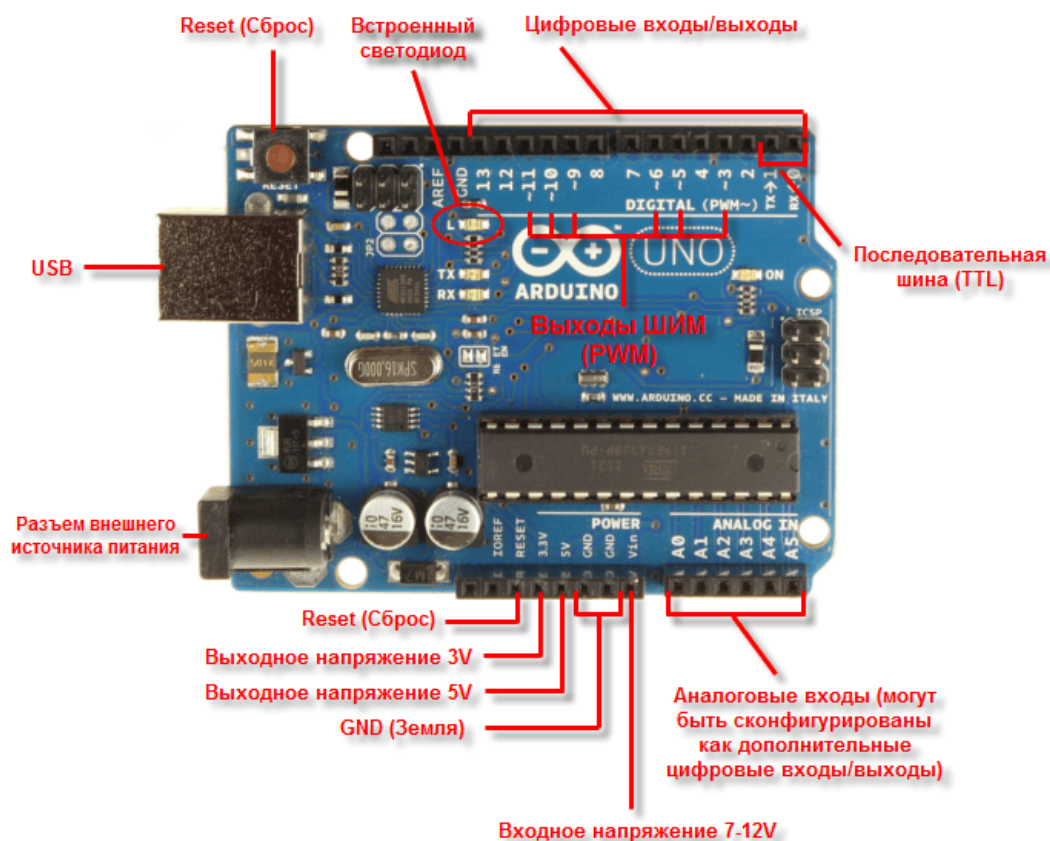


Рисунок 21 – Внешний вид микроконтроллера Arduino Uno и обозначение его элементов

Таблица 4 – Характеристики микроконтроллера Arduino Uno

Микроконтроллер	ATmega328
Рабочее напряжение, В	5
Входное напряжение (предельное), В	6-20
Постоянный ток через вход/выход, мА	40
Постоянный ток для вывода 3.3 В, мА	50
Flash-память, Кб	32, из которых 0.5 используются для загрузчика
ОЗУ, Кб	2
EEPROM, Кб	1
Тактовая частота, МГц	16

### 2.2.2 Платформа Arduino Mega

Микроконтроллер Arduino Mega построен на базе микропроцессора ATmega2560. На плате представлено 54 цифровых входов/выходов в числе которых: 15 для вывода широтно-импульсных модулированных управляющих сигналов, 16 аналоговых входов, вход для кварцевого генератора синхроимпульсов, разъем для подключения программатора, разъем USB, силовой разъем для подключения питания и кнопка перезагрузки [33].

Схема подключения микроконтроллера Arduino Mega и модуля MP3 Music Shield представлена на рисунке 22. В таблице 5 представлены основные характеристики устройства на базе Arduino Mega с модулем расширения [33, 34]. Подключение модуля к вибропреобразователям осуществляется через согласующее устройство с усилительным каскадом.

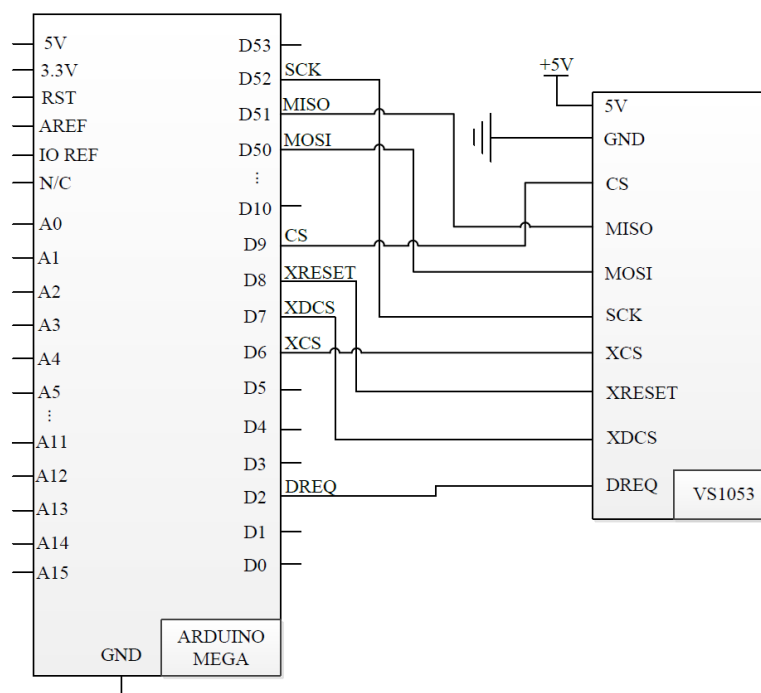


Рисунок 22 – Схема подключения микроконтроллера Arduino Mega с модулем MP3 Music Shield

Таблица 5 – Основные характеристики контроллера Arduino Mega

Микроконтроллер	ATmega2560
Рабочее напряжение, В	5
Входное напряжение (предельное), В	6-20
Постоянный ток через вход/выход, мА	40
Постоянный ток для вывода 3.3 В, мА	50
Flash-память, Кб	256
ОЗУ, Кб	8
EEPROM, Кб	4
Тактовая частота, МГц	16
Частота дискретизации, КГц	8..48
Количество бит на отсчёт сигнала, бит	16
Максимальный коэффициент усиления	в 64 раза

Для обеспечения адекватности оценок вибрации было использовано согласующее устройство, представляющее собой четырёхполюсник с высоким входным и низким выходным сопротивлением.

### 2.2.3 Плата расширения Music Shield VS1053b

Для обеспечения возможности синхронной записи сигналов по двум каналам используется модуль расширения Music Shield на базе чипа VS1053b.

Функциональное назначение модуля – запись и воспроизведение звуковых файлов в форматах MP3, WAV, MIDI, Ogg Vorbis. При проигрывании файлы считываются с microSD флеш-карты, устанавливаемой в соответствующий слот на плате [4]. Внешний вид модуля представлен на рисунке 23.

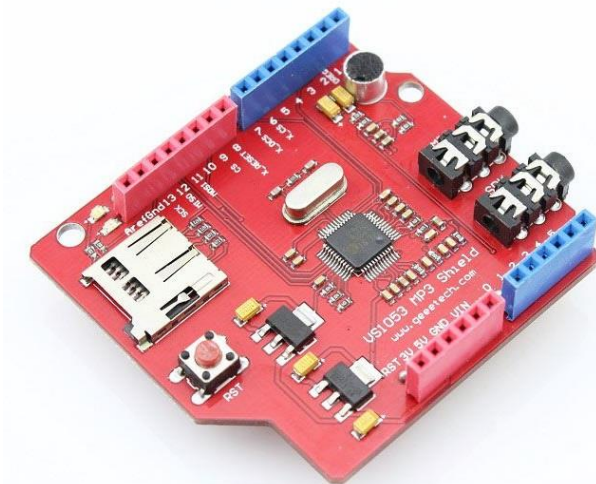


Рисунок 23 – Внешний вид модуля расширения для звукозаписи

Подключение модуля к микроконтроллеру осуществляется с помощью подключения соответствующих портов PIN. При подключении микроконтроллера к модулю расширения для звукозаписи использована схема на рисунке 3. Питание модуля (5 В) подается от микроконтроллера, а питание на микроконтроллер подается с помощью USB-провода. Компоненты описанного выше устройства на базе платформы Arduino представлены на рисунке 4.



## 2.2.4 Программное обеспечение

Разработка программного обеспечения для микроконтроллеров Arduino возможна в стандартной среде Arduino IDE с открытым исходным кодом, которая совместима с Windows, Mac OS X, и Linux. Но для разработки программного обеспечения была выбрана среда Visual Studio с использованием расширения Visual Micro в связи с наиболее расширенным функционалом, а также исходя из опыта использования Visual Studio.

Visual Micro полностью совместим со средой разработки Arduino и использует те же библиотеки, исходный код и средства разработки, отличаясь лишь пользовательским интерфейсом[38].

Фрагмент исходного кода записи сигналов, используемый в устройстве, представлен ниже на рисунке 26.

```
2324 void SFEMP3Shield::recording(char *recfile) {
2325     unsigned long fileSize = 0;
2326     unsigned int n;
2327
2328     SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV16);
2329     Mp3WriteRegister(SCI_BASS, 0x0055);           //set accent
2330     Mp3WriteRegister(SCI_AICTRL0, 8000);          //samplerate 8k
2331     Mp3WriteRegister(SCI_AICTRL1, 0);             //record gain
2332     Mp3WriteRegister(SCI_AICTRL2, 0);             //Set the gain maximum,65536=64X
2333     Mp3WriteRegister(SCI_AICTRL3, 6);             //PCM Mode ,right channel,board mic
2334     Mp3WriteRegister(SCI_CLOCKF, 0x2000);         //set clock
2335     Mp3WriteRegister(SCI_MODE, 0x1804);           //mic,Initialize recording
2336     delay(2);
2337
2338     loadPlugin(recPlugin, sizeof(recPlugin) / sizeof(recPlugin[0]));
2339
2340     SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV2);
2341     track.remove(&root, recfile);
2342
2343     if (track.open(recfile, O_WRITE | O_CREAT) == NULL)
2344     {
2345         Serial.println("Rec open fail");
2346         return;
2347     }
2348     Serial.println("Recording ...");
2349     SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV16);
2350     while (Serial.read() != 'z')
2351     {
2352         unsigned char *rbp = fileBuf;
2353
2354         if ((n = Mp3ReadRegister(SCI_HDAT1)) > 0)
```

Рисунок 26 – Фрагмент исходного кода записи сигналов



## 2.3 Реализация на базе одноплатного компьютера Raspberry Pi

При реализации решения с использованием микрокомпьютера Raspberry Pi получаем устройство для приёма сигналов вибрации и их обработки непосредственно на самой плате. Устройство состоит из следующих элементов:

- Одноплатный микрокомпьютер Raspberry Pi;
- Звуковая карта Wolfson Audio Card;
- Микрофонные предусилители;
- Датчики вибрации;
- Цветной LCD дисплей;
- Соединительные провода.

Схема подключения компонентов устройства представлена на рисунке 9.

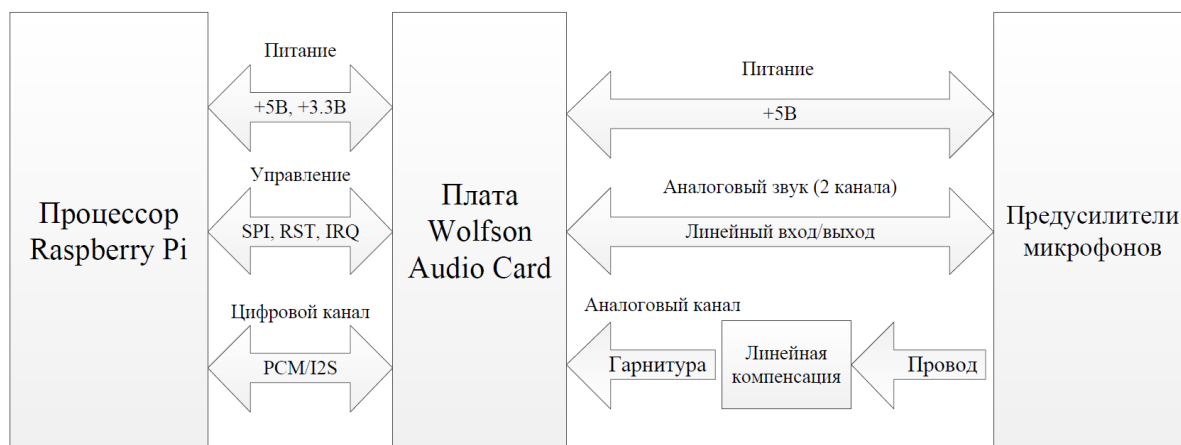


Рисунок 27 – Схема подключения компонентов

### 2.3.1 Особенности архитектуры компьютеров Raspberry Pi

Микрокомпьютер Raspberry Pi построен на основе чипа Broadcom BCM2835. Процессор BCM2835 выпущен американской корпорацией Broadcom Corporation, содержит ядро цифрового сигнального процессора — специализированный микропроцессор, который предназначен для цифровой обработки сигналов. Схема размещения компонентов Raspberry Pi представлена на рисунке 10.

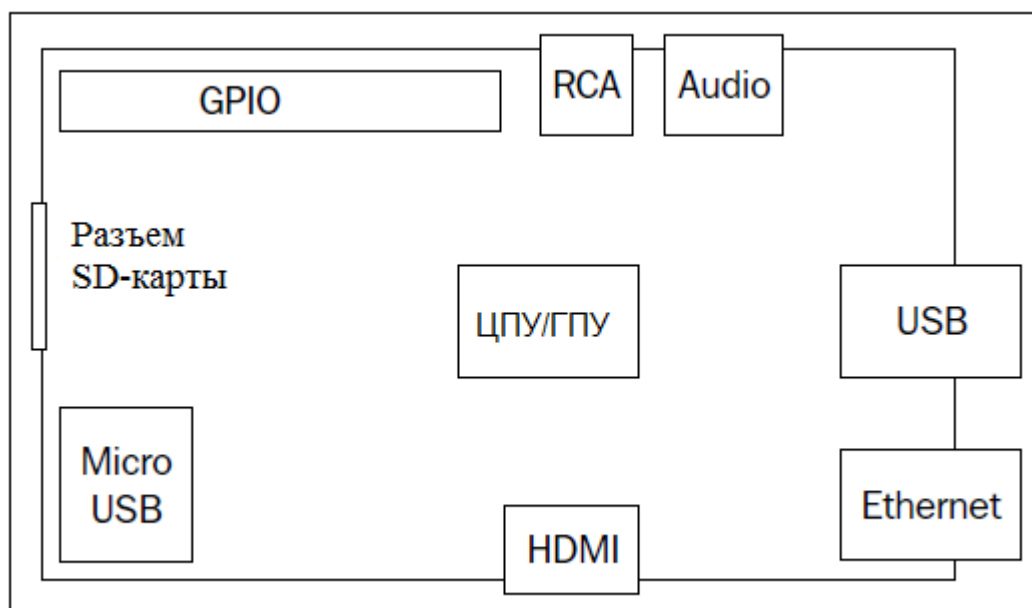


Рисунок 28 – Схема размещения компонентов Raspberry Pi

Видеосигнал выводится через разъём RCA или через цифровой порт HDMI. Файловые данные, образ ядра и операционная система располагаются на картах памяти SD, MMC. На плате содержатся вход/выходы GPIO (интерфейс ввода/вывода общего назначения), к которым можно подключать разнообразные периферийные устройства (исполнительные устройства, датчики, дисплеи, контроллеры, разные модули). Питание может осуществляться с помощью кабеля micro-USB, либо с помощью аккумулятора на основе micro-USB. Для подключения клавиатуры и мыши на плате предусмотрены USB-порты, а для подключения интернета присутствует разъём Ethernet.

### 2.3.2 Одноплатный компьютер Raspberry Pi B

Данная версия микрокомпьютера является более функциональной и имеет больше разъемов, в сравнении с предыдущей моделью. А именно, на плате 512 Мб оперативной памяти (вместо 256 Мб), 2 USB разъема (вместо 1 разъема). В остальном, устройство имеет те же 26 GPIO вход/выходов, HDMI и RCA разъемы для подключения видео и Ethernet разъем. Внешний вид данной версии представлен на рисунке 11.



Рисунок 29 – Внешний вид микрокомпьютера Raspberry Pi B

Наиболее новые версии микрокомпьютеров Raspberry не рассматривались, в связи с несовместимостью со звуковой картой Wolfson Audio, представленной далее.

### 2.3.3 Звуковая карта Wolfson Audio

Для обеспечения возможности синхронной записи сигналов по двум каналам используется модуль расширения Wolfson Audio Card, выполненный на базе чипа WM5102, который применяется в смартфонах, планшетных компьютерах и других портативных аудиоустройствах, позволяющих воспроизводить аудио высокого разрешения, в том числе и аудио оборудовании класса Hi-End. Также на плате имеется S/PDIF-трансивер на базе WM8804 и цифровой MEMS микрофон WM7220 для высококачественного аудио захвата и записи. Внешний вид платы Wolfson Audio Card представлен на рисунке 12.

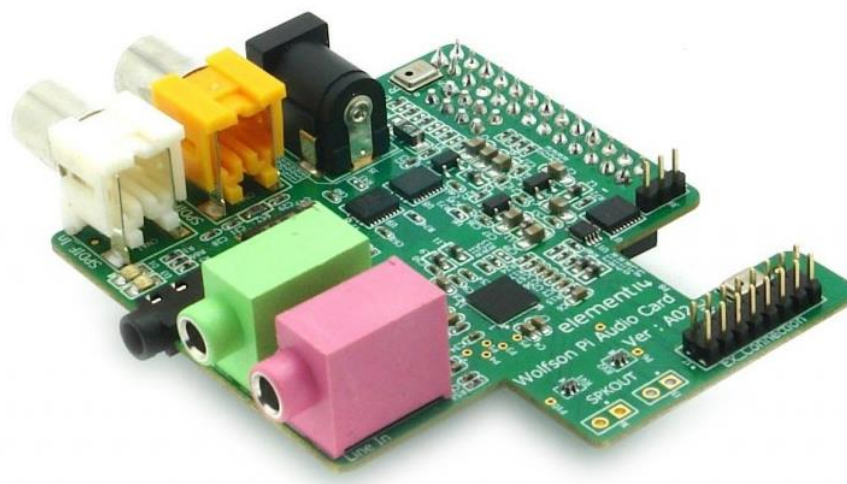


Рисунок 30 – Внешний вид платы Wolfson Audio Card

Выбор данной звуковой карты обусловлен возможностью синхронной двухканальной записи сигналов и совместимостью с микрокомпьютером Raspberry Pi. Звуковая карта имеет следующие возможности:

- воспроизведение звуковых файлов высокого качества;
- возможность подключения Raspberry Pi с помощью портов стерео линии входа и выхода;
- создание VOIP конференции с Raspberry Pi;
- подключение микрофона и гарнитуры для выполнения VOIP звонков;
- запись звука в высоком качестве при помощи микрофонов или портов line-in;
- возможность голосовой активации Raspberry Pi с помощью встроенных цифровых микрофонов;
- встроенный усилитель звуковой мощности класса D для внешних динамиков с подключением к внешнему источнику питания;
- разъем для дополнительных функций.

#### 2.3.4 Программное обеспечение

Микрокомпьютер Raspberry Pi так же, как и в обычных компьютерах, работает под управлением операционной системы, которая управляет всеми

ресурсами микрокомпьютера и предоставляет пользователю определенный интерфейс для работы с программами. От выбора системы зависит удобство использования устройства. Под Raspberry Pi написано множество разных операционных систем. Практически все операционные системы Raspberry Pi базируются на Linux системе. Существует несколько официально поддерживаемых операционных систем[39]:

- Raspbian – официальная ОС, которая обладает всем необходимым программным обеспечением.
- OpenELEC – медиапроигрыватель на основе Linux с открытым исходным кодом.
- OSMC (Raspbmc) – медиапроигрыватель с открытым исходным кодом на базе Kodi Media Center и Debian GNU/Linux.
- Поддержка Windows 10 в устройствах Raspberry Pi 2B.

Производителем рекомендуется использовать операционную систему Raspbian ОС. Стандартная операционная система на базе Debian специально создана под обеспечение этого миникомпьютера. Поставляется с набором стандартных программ и утилитами. В разделе «программирование» имеется более десятка различных приложений для программирования. В системе установлен браузер Chromium, пакет LibreOffice для работы с документами.

Для программирования в Raspbian ОС предустановлены пакеты Python, Scratch, Node-RED, SonicPi и Wolfram Mathematica.

## **2.4 Апробация созданных устройств**

### **2.4.1 Применение устройства на базе Arduino Mega**

С целью апробации устройства на базе Arduino произведена серия экспериментов, направленных на определение особенностей распространения вибрационных сигналов сквозь слой песка, заполняющего металлическую емкость. В ходе эксперимента, датчики ДН-4-М1 крепились на стенки емкости с помощью магнитных прижимов МП-5 в различных, относительно уровня

песка, положениях, а также на её дно. Вибрационный сигнал имитировался вибродинамиком, расположенным непосредственно на поверхности песка. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 31, вид экспериментальной установки представлен на рисунке 32.

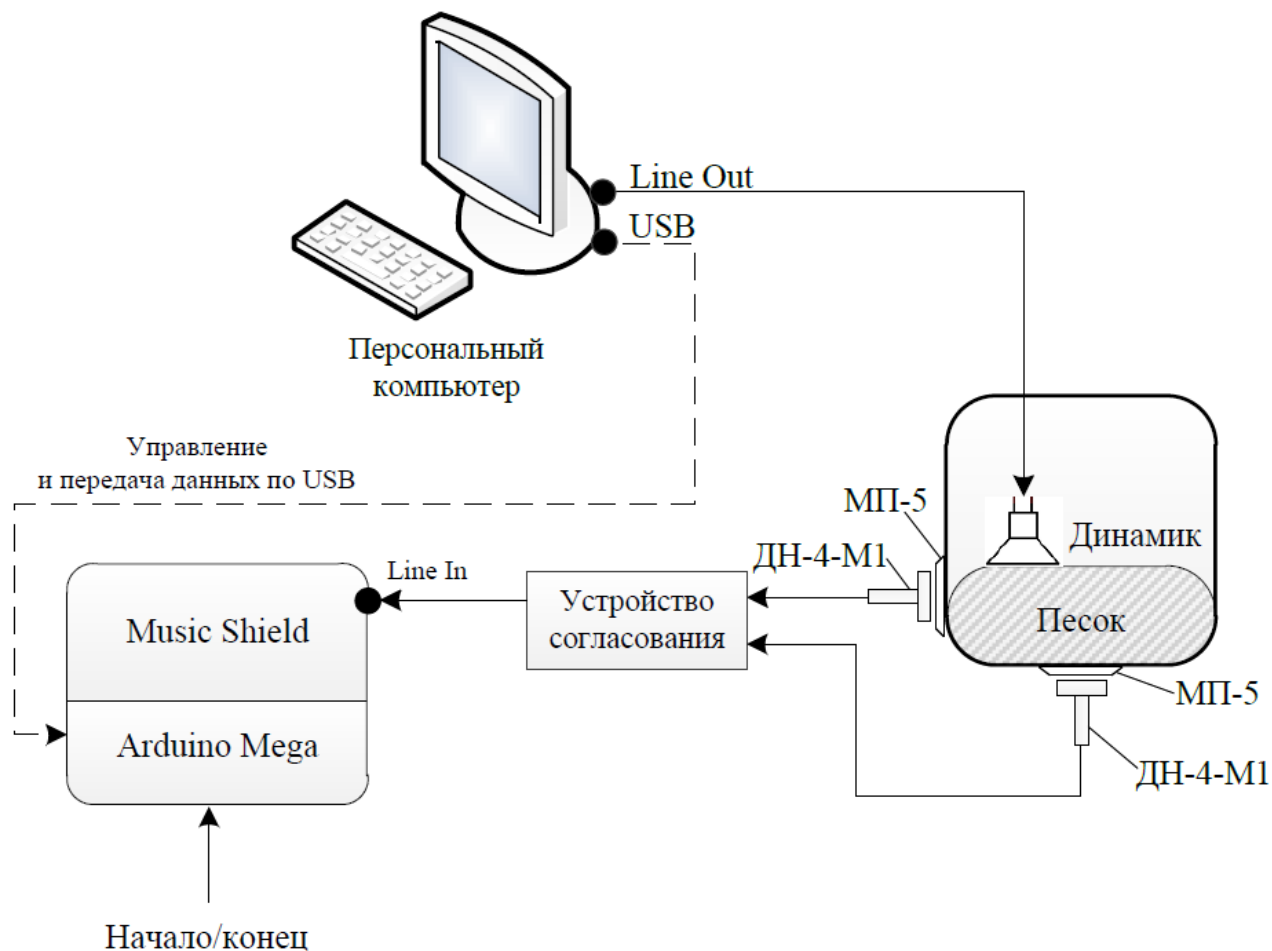


Рисунок 31 – Схема экспериментальной установки аэрации



Рисунок 32 – Металлическая емкость, заполненная песком, с установленными датчиками

Полученные в ходе эксперимента результаты и закономерности не противоречат принципам распространения сигнала, в целом, и свидетельствуют о работоспособности созданного аппаратного решения. В качестве примера, на рисунке 33 представлен вид зависимости коэффициента усиления сигнала от частоты для двух датчиков, расположенных на расстоянии 5 см друг от друга.

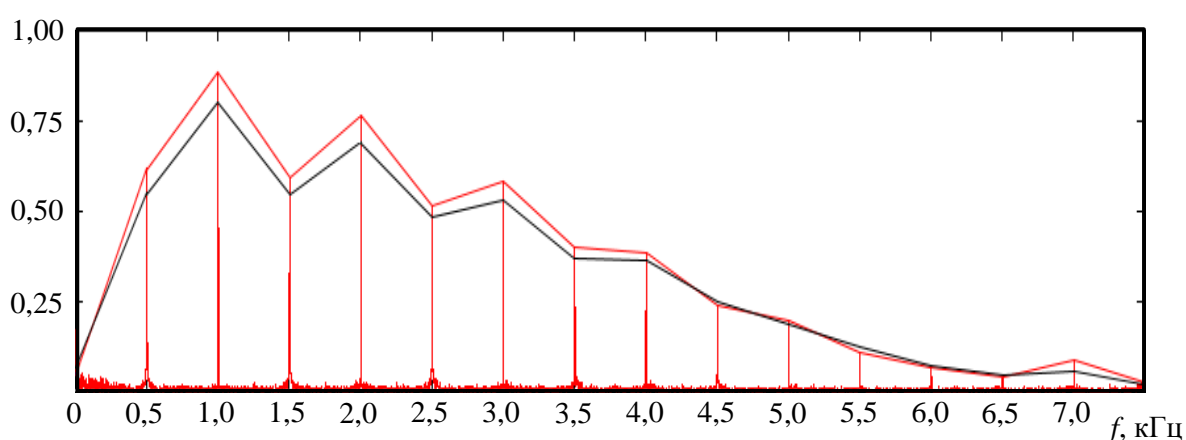


Рисунок 33 – Зависимость коэффициента усиления сигнала от частоты

Стоит отметить, что данное устройство, при условии добавления клавиатуры и экрана может быть частью тепчепоискового комплекса на базе ПК, а также частью вибродиагностического комплекса, применяемого для анализа вибрации ДВС.

#### 2.4.2 Применение устройства на базе Raspberry Pi

В целях апробации устройства на базе Raspberry Pi В были проведены следующие исследования:

- разработано программное обеспечение для оценки времени запаздывания прихода сигнала (простейшим и корреляционным методом);



- осуществлена проверка устройства в экспериментальной установке с микрофонами.

#### 2.4.2.1 Метод оценки времени запаздывания регрессионным методом

Регрессионный метод оценки времени запаздывания включает в себя методы, основанные на применение алгоритмов регрессии параметров модели сигнала. Общая схема такого метода представлен на рисунке 34.

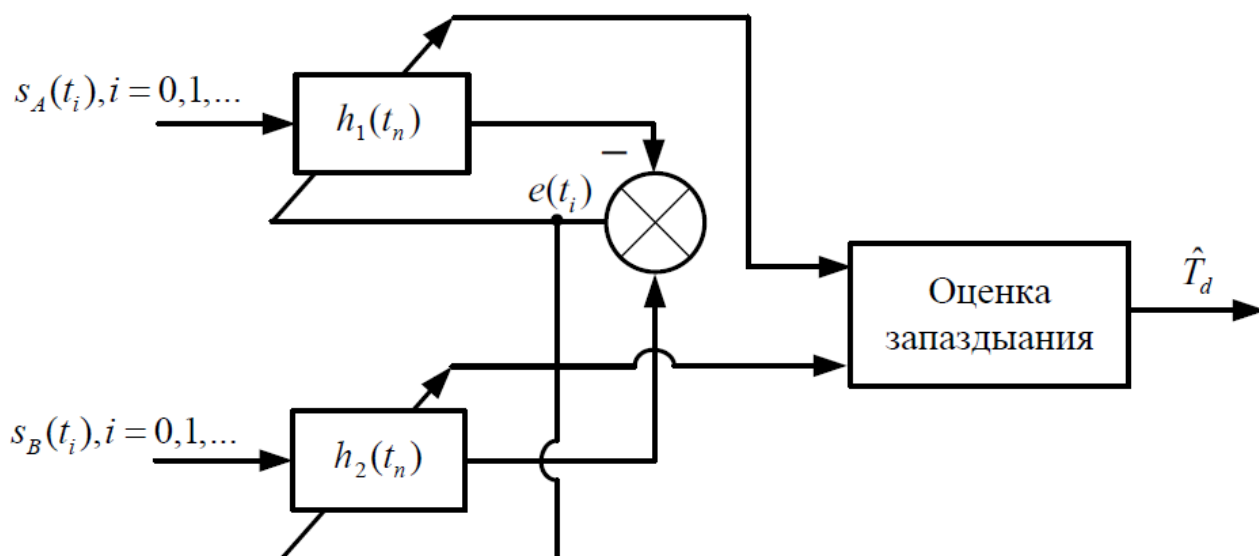


Рисунок 34 – Схема регрессионного метода оценки времени запаздывания

Данный метод основан на минимизации функции отклонения между смещенными во времени сигналами:

$$f_{ADF}(\tau_j) = \sum_{i=0}^{N-1} |s_A(t_i) - s_B(t_i + \tau_j)|. \quad (2.1)$$

В ходе работы было разработано ПО, осуществляющее выполнение данного алгоритма на языке C++. На вход подаются две последовательности чисел (массивы), являющиеся примером данных оцифрованного звука в двух каналах ( $S_A$  – левый канал,  $S_B$  – правый канал), на основе которых выполняется оценка запаздывания прихода сигнала. Преимуществом данного метода, является простейший не корреляционный алгоритм вычисления при обнаружении сигнала, а также отсутствие умножений в алгоритме. Но данный метод не лишен и недостатков, который заключается в оценке времени



запаздывания, в особенности при высокой зашумлённости или искаженности сигналов. Фрагмент разработанного ПО представлен на рисунке 35. Результат выполнения программы, отображенный на рисунке 36, говорит о том, что левый канал сдвинут относительно правого на 2 отчета.

```

16  int main()
17  {
18      using namespace std;
19      setlocale(LC_ALL, "Russian");
20      int s2[16] = { 0, 3, 6, 9, -1, 23, -5, 11, 0, 3, 6, 9, -1, 23, -5, 11 };
21      int s1[16] = { 6, 9, -1, 23, -5, 11, 0, 3, 6, 9, -1, 23, -5, 11, 0, 3 };
22      int siz = sizeof(s1) / sizeof(char *);
23      int min, sum, min_index, i = 0, j = 0;
24      const int n = 8;
25      int N = 16;
26      min = 0;
27      for (i = 0; i < n-1; i++)    min = min + myabs(s1[i] - s2[i]);
28      for (j = 1; j < n-1 ; j++)
29      {
30          sum = 0;
31          for (i = 0; i < n - 1; i++)
32              sum = sum + myabs(s1[i] - s2[i + j]);
33          if (sum < min)
34          {
35              min = sum;
36              min_index = j;
37          }
38      }
39      cout << "Min sum " << min << std::endl;
40      cout << "Index " << "[" << min_index << "]" << std::endl;
41
42      _getch();
43      return 0;
44  }

```

Рисунок 35 – ПО оценки времени запаздывания сигнала регрессионным методом

```

C:\Users\Ваня\Documents\Visual Studio 2015\Projects\ConsoleApplication8\Debug\ConsoleAppli...
Min sum 0
Index [2]

```

Рисунок 36 – Результат выполнения ПО регрессионного метода оценки времени запаздывания

#### **2.4.2.2 Метод оценки времени запаздывания корреляционным методом**

Вычисление корреляционных функций представляет собой трудоемкую, в плане количество необходимых арифметических операций, задачу. В связи с этим, для того, чтобы производить обработку сигналов при реализации корреляционного метода и не иметь существенных ограничений при выборе параметров анализа, необходима качественная программная реализация алгоритмов, позволяющая максимально эффективно использовать вычислительные ресурсы системы. Остро ограниченным ресурсом, в контексте данной задачи, является процессорное время и его недостаточность, в первую очередь, сказывается на быстродействии.

Алгоритм оценки времени запаздывания корреляционным методом заключается в следующем:

1. Для каждого из  $Q$  временных окон выполняем 1-3;
2. Получаем спектры сигналов, используя БПФ;
3. Перемножением комплексных отсчётов получаем взаимный спектр;
4. Усредняем взаимный спектр;
5. Вычисляем корреляционную функцию, используя обратный БПФ;
6. Находим аргумент максимума.

В основу метода положена фильтрация сигналов в нескольких неперекрывающихся частотных интервалах при помощи цифровых полосовых фильтров и дальнейшее вычисление корреляции на каждом из рассматриваемых интервалов. Схема алгоритма с накоплением представлена на рисунке 37. Блок схема данного алгоритма представлена на рисунке 39.

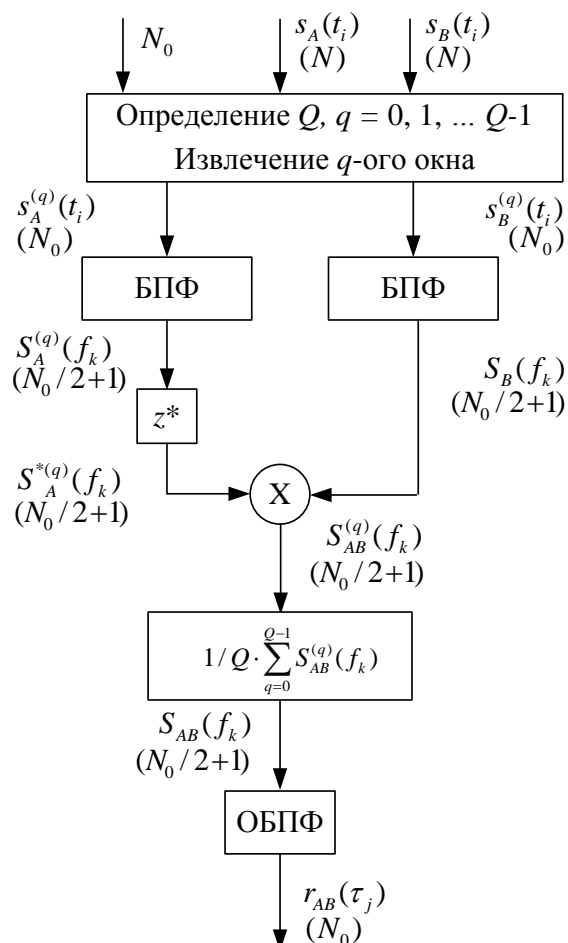


Рисунок 37 – Схема алгоритма с накоплением

```
// DFT of the three input signals from the microphones
X1 = fft(x1)
X2 = fft(x2)

//The phase difference is calculated
ph_diff_12 = angle(X1* conj(X2))

// The phase difference is converted to a TDOA
tdoa_12 = ph_diff_12 / (2 * pi*f)

// A weighting is made from the DFT of x2
weight = abs(X2)
weight = weight / sum(weight)

// The weighted mean of the TDOA is calculated
mean_tdoa_12 = sum(tdoa_12 * weight)

// The TDOA returned
return (mean_tdoa_12)
```

Рисунок 38 – Программная реализация корреляционного метода оценки времени запаздывания

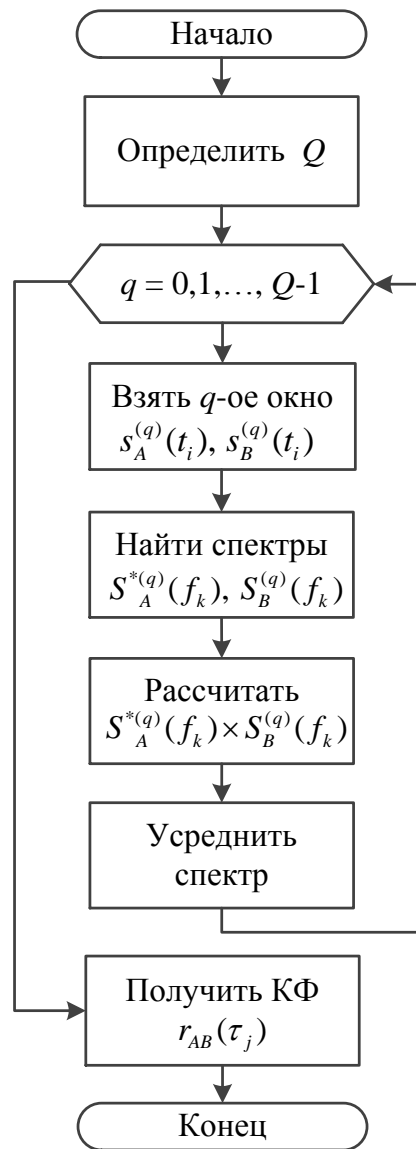


Рисунок 39 – Блок-схема алгоритма с накоплением

В сравнении с регрессионным методом оценки времени запаздывания, корреляционный метод требует больших вычислительных мощностей, в связи с содержанием в вычислениях умножений. Однако данный метод обладает такими преимуществами, как повышенное шумоподавление и наглядность представления функции на выходе коррелятора.

### 2.4.3 Учебный стенд для оценки времени запаздывания

В качестве учебного стенда предлагается выполнить оценку расстояния до источника сигнала, с помощью схемы, представленной на рисунке 40:

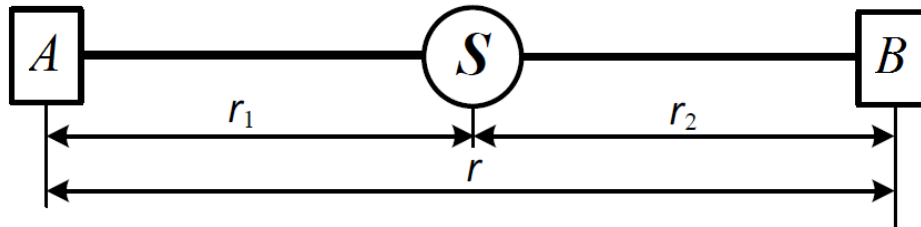


Рисунок 40 – Схема оценки расстояния до источника сигнала

Основная формула, по которой производятся расчеты:

$$l_{A,B} = \frac{r \pm \frac{j_0}{f_d} v}{2},$$

где  $s_A(i)$ ,  $s_B(i)$  – сигналы датчиков;

$r$  – расстояние между датчиками;

$j_0$  – величина задержки (в отсчетах);

$v$  – скорость сигналов;

$l_{A,B}$  – расстояния до утечки от датчиков.

Схема учебного стенда представлена на рисунке 41. Сигнал распространяется на 2 приёмника, с которых происходит снятие сигнала по двум каналам и выполняется их синхронизация. В данном стенде использованы недорогие микрофоны вместо вибродатчиков, в связи с дороговизной последних и нецелесообразности применения в данном случае. Затем сигнал поступает в блок обработки данных, где происходит вычисление корреляционной функции с дальнейшим поиском пика КФ. После чего, с помощью небольших вычислений и расчетов, можно определить время запаздывания прихода сигнала.

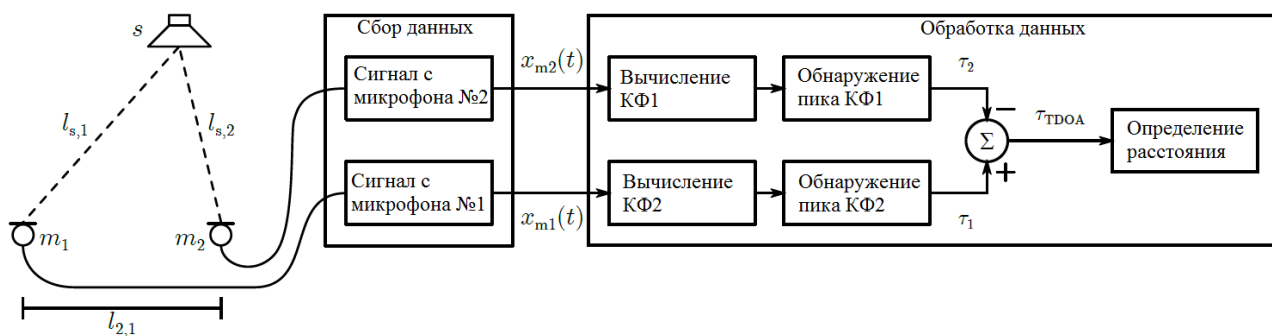


Рисунок 41 – Схема учебного стенда для оценки времени запаздывания

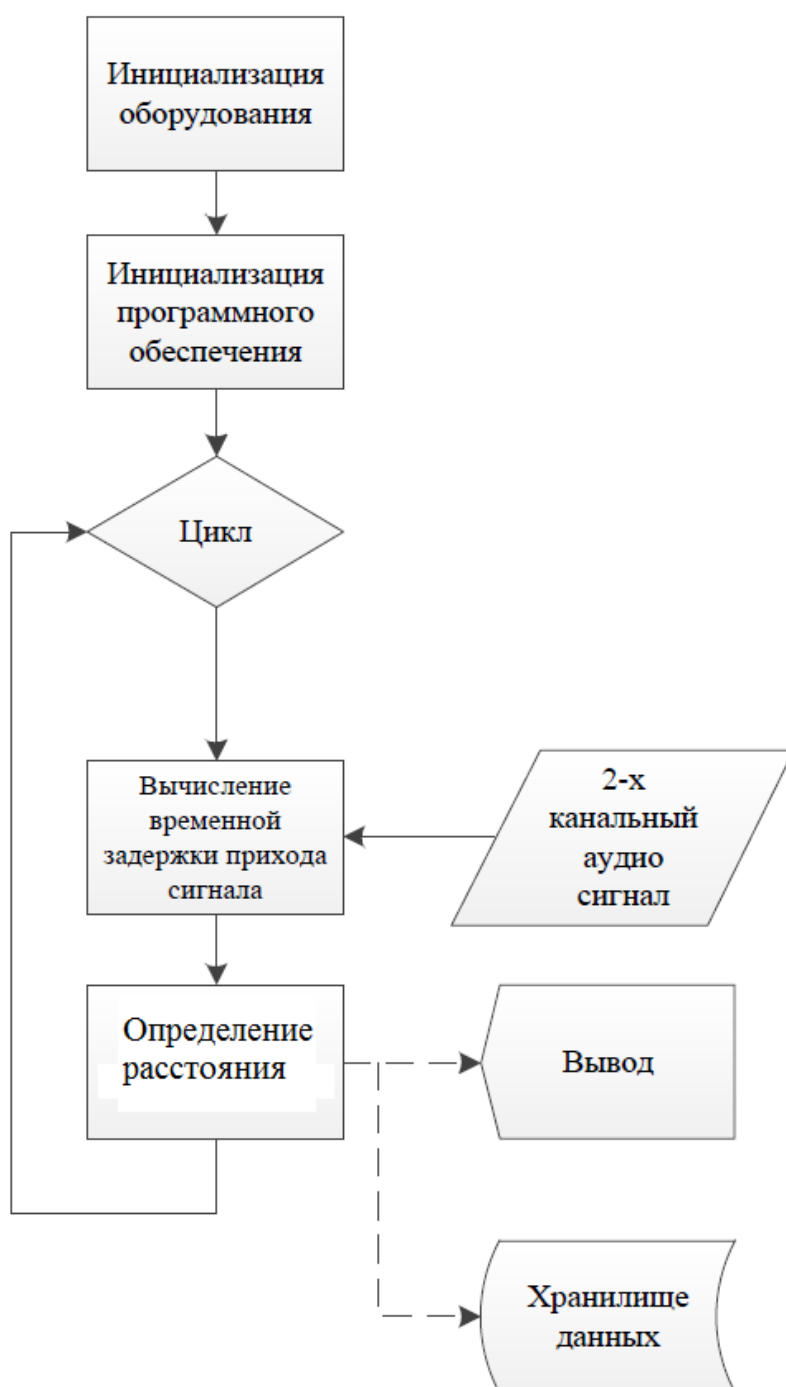


Рисунок 42 – Блок схема выполнения алгоритмов программного обеспечения

### **3. Социальная ответственность**

В данной работе представлена реализация устройства сбора и обработки виброакустических сигналов на базе одноплатной микропроцессорной платформы. Управление устройством реализовано на базе микроконтроллера Arduino Mega и на базе микрокомпьютера Raspberry Pi. Устройство может применяться в лабораторных экспериментах по диагностике двигателей внутреннего сгорания автомобилей, а также при решении задач определения положения трубопроводных утечек.

#### **3.1 Проблемы диагностики инженерных сетей**

В обследовании инженерных систем отопления и водоснабжения, обязательным условием является оценка состояния трубопроводов, нагревательных приборов и их коррозия. При обследовании инженерных систем, их состояние коррозии, определяют глубину максимального поражения стенок, а также по сечению поврежденных труб, в сравнении с новыми элементами[46].

Наибольшую сложность вызывают вопросы эксплуатации и диагностики подземных инженерных сетей, в т.ч. и тепловых сетей канального исполнения. Для случая с тепловыми сетями, диагностика – это косвенный контроль состояния инженерно-технического оборудования и строительных конструкций, скрытых слоем грунта, а в городских условиях дополнительно слоями асфальта, щебня, а в ряде случаев и слоем строительного мусора, от визуального наблюдения. В большинстве городов Центрального и Северо-Западного регионов РФ подземная прокладка составляет до 80% трубопроводов тепловых сетей, до 20% сетей горячего водоснабжения, а для сетей холодного водоснабжения этот показатель составляет почти 100%[46].

Основная проблема диагностики состояния таких сетей связана с недостатком диагностирующих приборов и методов диагностики, предлагаемых для эксплуатационных предприятий и сервисных центров,

занимающихся вопросами эксплуатации инженерных сетей. Проблемы диагностики при эксплуатации инженерно-технического оборудования инженерных сетей во многом схожи с проблемами, возникающими при эксплуатации газотранспортного оборудования, где технической диагностике уделяется должное внимание[46].

### 3.2 Эксплуатация литий-ионного аккумулятора

В разрабатываемом устройстве используется модуль Power Shield, в котором находится литий-ионный аккумулятор на 2000 мА·ч. Не смотря на то, что в модуле используется защита от перегрузки, при эксплуатации литий-ионные аккумуляторы требуют определенного технического ухода.

#### *Защита от перегрузки*

В аккумулятор встроена защита от перегрузки — если ток превысит 900 мА, сработает контур предохранителя и устройство выключится. Чтобы сбросить блокировку, на несколько секунд подключите к Power Shield зарядное устройство.

*Перегрев.* Не допускайте попадания на мобильные устройства прямых солнечных лучей, а также не оставляйте их в непосредственной близости от источников тепла, например электрообогревателей. Максимально допустимые температуры, при которых возможно использование литий-ионных аккумуляторов: от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$

#### *Взрывоопасность*

Литиевые аккумуляторы изредка проявляют склонность к взрывному самовозгоранию. Интенсивность горения даже от миниатюрных аккумуляторов такова что может приводить к тяжким последствиям. Авиакомпании и международные организации принимают меры к ограничению перевозок литиевых аккумуляторов и устройств с ними на авиатранспорте.



Самовозгорание литиевого аккумулятора очень плохо поддается тушению традиционными средствами. В процессе термического разгона неисправного или поврежденного аккумулятора происходит не только выделение запасенной электрической энергии, но и ряд химических реакций, выделяющих энергию для саморазогрева, кислород и горючие газы. Потому вспыхнувший аккумулятор способен гореть без доступа воздуха и для его тушения непригодны средства изоляции от атмосферного кислорода. Более того, металлический литий активно реагирует с водой с образованием горючего газа водорода, потому тушение литиевых аккумуляторов водой эффективно только для тех видов аккумуляторов, где масса литиевого электрода невелика. В целом тушение загоревшегося литиевого аккумулятора неэффективно. Цель тушения снизить температуру аккумулятора и предотвратить распространение пламени.

Меры безопасности: Литий-ионные аккумуляторы обладают очень высокой удельной энергией. Соблюдайте осторожность при обращении и тестировании. Не допускайте короткого замыкания аккумулятора, перезаряда, разрушения, разборки, протыкания металлическими предметами, подключения в обратной полярности, не подвергайте их воздействию высоких температур. Это может нанести физический ущерб.

### 3.3 Меры безопасности при работе с дисплеями

Дисплей можно отнести к средству отображения информации (СОИ), это следует из ГОСТ-27833-88.

СОИ – Устройство обеспечивающее отображение информации в виде, пригодном для зрительного восприятия.

*Примечание.* Под электронными средствами отображения информации понимают СОИ, выполненные на основе электронных приборов: полупроводниковых, электронно-лучевых, газоразрядных и др.

*Требования безопасности к визуальным параметрам*

- Яркость знака должна быть не менее 35 кд/м<sup>2</sup> для LED дисплеев;
- Неравномерность яркости рабочего поля экрана непосредственно должна быть не более 20 %;
- Неравномерность яркости элементов знака должна быть не больше 20%;
- Яркостный контраст изображения должен быть не менее 3:1;
- Яркостный контраст внутри знака и между знаками должен быть не менее 3:1.

*Примечание.* Если в документации на дисплей не оговорено проектное расстояние наблюдения, то его принимают равным 50 см (обычно это расстояние от конца самого длинного пальца до локтя) для дисплеев с размером экрана по диагонали 14" - 17" и 75 см - для экранов 19" - 21". Однако желательно использовать расстояние вытянутой руки.

### **3.4 Калибровка вибропреобразователей**

Калибровка средства измерений — совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений.

Калибровка средств измерений производится преимущественно метрологическими службами юридических лиц с использованием эталонов, соподчинённых государственным эталонам единиц величин.

В России калибровочная деятельность регламентирована Законом РФ «Об обеспечении единства измерений» и многими другими подзаконными актами. В нормативных документах не очень чётко разграничены понятия «калибровка» и «поверка». Калибровку вибропреобразователей следует проводить 1 раз в 2 года методом сравнения, представленным далее.

Метод сравнения, при применении которого калибруемый вибродатчик механически соединен с образцовым датчиком (эталон), используется при заводской калибровке акселерометров. На основе аппаратуры ZETLAB можно

создать автоматизированную систему для поверки вибродатчиков на основе метода сравнения. Такие системы эффективны как при лабораторной, так и при регулярной и повседневной калибровке акселерометров.

Калибруемый методом сравнения акселерометр, т.е. акселерометр, чувствительность которого подлежит определению в процессе калибровки, механически соединяется с используемым в качестве образцового датчика акселерометром, например AP 10. Созданный таким образом комплект закрепляется на вибростоле подходящего и обладающего точно определенными параметрами вибростенда. Поскольку соединенные друг с другом калибруемый и эталонный акселерометры совершают механические колебания с идентичным ускорением, отношение амплитуд отдаваемых обоими электрических сигналов непосредственно является отношением присущих им значений чувствительности. Следовательно, на основе этого отношения и калиброванного значения чувствительности образцового акселерометра можно определить искомое значение чувствительности калибруемого акселерометра.

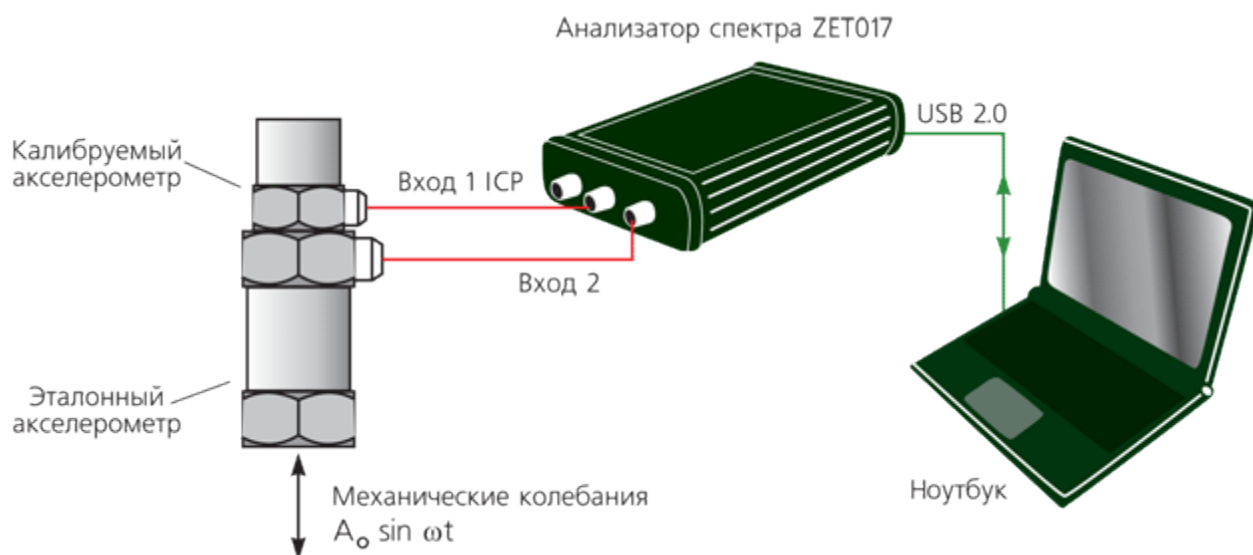


Рисунок 43 – Простая схема калибровки виброакселерометров

Самая простая система для калибровки акселерометров методом сравнения показана на рис. 43. Соединенным механически друг с другом

калибруемому акселерометру и эталонному акселерометру сообщаются механические колебания с синусоидальной формой волны и с определенными амплитудой ускорения и частотой. Отдаваемые этими акселерометрами электрические сигналы поступают на анализатор спектра, и с помощью электронного вольтметра, входящего в состав программного обеспечения ZETLAB, измеряются амплитуды сигналов.

В созданной на основе описанной выше системы более усовершенствованной калибровочной системе сигналы с калибруемого и образцового акселерометров усиливаются соответствующими предусилителями, т.е. усилителями заряда при определении чувствительности по заряду или усилителями напряжения при осуществляемой с целью определения чувствительности по напряжению калибровке. В процессе калибровки происходит одновременная обработка сигналов от калибруемого и эталонного акселерометров.

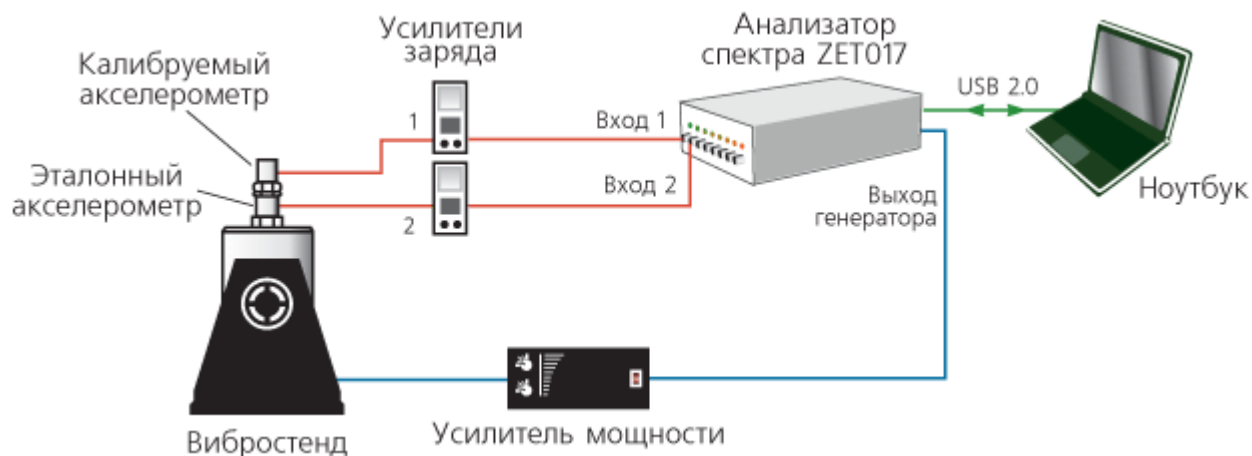


Рисунок 44 – Схема калибровки виброакселерометров

Применение схемы на рисунке 44 дает следующие возможности:

1. упрощение сравнения амплитуд отдаваемых обоими акселерометрами сигналов;
2. уменьшение занимаемого калибровкой времени;

3. обеспечение общей погрешности, соизмеримой с погрешностью заводской калибровки;
4. преобразование напряжения в заряд для определения чувствительности по напряжению и заряду.

Значения частоты и амплитуды ускорения механических колебаний обычно установлены учитываемым при калибровке стандартом или рекомендацией. Обычно в качестве опорных для заводской калибровки акселерометров принимаются равные 160 Гц и  $100 \text{ м/с}^2$  значения соответственно частоты и амплитуды ускорения механических колебаний. Обеспечение заранее определенных значений частоты и амплитуды ускорения механических колебаний не является обязательным в случае, если учитываемые при калибровке значения этих параметров находятся в пределах нормальных рабочих частотного и динамического диапазонов калибруемых акселерометров. Это вполне допустимо ввиду того, что пьезоэлектрические акселерометры являются линейными датчиками, т.е. вибродатчиками, обладающими линейными рабочими частотным и динамическим диапазонами.

### ***Условия окружающей среды***

Калибровку проводят при определенных условиях окружающей среды, представленных в таблице 6.

Таблица 6 – Условия проведения калибровки датчиков

	Пример 1	Пример 2
Температура окружающего воздуха	$(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$	$(23 \pm 10) ^\circ\text{C}$
Относительная влажность	не более 75%	не более 90%

### 3.5 Экологическая безопасность

Вопрос утилизации АКБ, включая литиево-ионные, является актуальным для экологических учреждений, органов здравоохранения. В России утилизация литий-ионных аккумуляторов — единственная возможность сохранить экологический баланс, ведь достаточно часто АКБ в виду экологической безграмотности населения, попросту попадают на городские свалки. Между тем отработанные элементы питания могут привести к экологической катастрофе, а при неконтролируемом хранении становятся взрывоопасными. Именно поэтому АКБ должны подлежать сбору и вывозу на спец. предприятия.

В результате неграмотной эксплуатации внутри литий-ионного аккумулятора может произойти короткое замыкание, ведь разогрев реагентов достигает 450 гр. В современных литиевых АКБ установлена специальная система, значительно повышающая уровень безопасности. При достижении давлением определенной отметки специальный клапан выпускает пары растворителя, останавливая систему. Грамотная утилизация литий-ионных аккумуляторов позволяет снизить риск нарушения работы системы, избежать загрязнения окружающей среды диоксидами серы, парами соляной кислоты и другими продуктами горения лития.

#### ***Основные этапы утилизации литий-ионных аккумуляторов***

Почти 80% материалов АКБ подлежат переработке, могут повторно использоваться в каком-либо производстве. Сегодня утилизация литий-ионных аккумуляторов предполагает несколько этапов:

1. Вывоз на спец. предприятие.
2. Вскрытие, извлечение содержимого.
3. Вымывание электролита, в котором содержатся соли лития.
4. Разделение катодных и анодных пластин.
5. Растворение адгезии, удаление с пластин основного материала анода и катода.

6. Переплавка пластин меди и алюминия.
7. Измельчение и переплавка пластикового корпуса для дальнейшего использования в качестве добавки для покрытий автодорог.

#### **4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

В данной работе представлена разработка устройства виброакустического контроля на базе одноплатной микропроцессорной платформы. Управление устройством реализовано микроконтроллером Arduino Mega. Устройство применяется в лабораторных экспериментах по диагностике двигателей внутреннего сгорания автомобилей, а также при решении задач определения положения трубопроводных утечек

#### **4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

##### **4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Потенциальными потребителями данного исследования могут являться промышленные предприятия, производственные фирмы, а также коммунальные службы при диагностике трубопроводов.

На рисунке 45 изображена сегментация рынка по разработке устройства (в зависимости от используемых датчиков).

		Вид светодиодного табло		
		Реализация на базе микроконтроллера	Реализация на базе микрокомпьютера	Реализация на базе ноутбука
Потребители	Промышленные предприятия			
	Производственные фирмы			
	Гор. службы водоснабжения			

Рисунок 45 –Карта сегментирования рынка по разработке устройства (в зависимости от используемых датчиков)



#### 4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

В таблице 7 приведена оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений. В качестве конкурентного технического решения были рассмотрен акустический течеискатель ТА-13 и корреляционный течеискатель К-10. Недостатком последнего может являться затруднение доступа к месту установки датчиков и акустические помехи работающего оборудования, местных сопротивлений. При использовании акустического течеискателя ТА-13 не исключены такие недостатки как:

- влияние особенностей грунта затуханию акустических колебаний;
- сложность (иногда невозможность) выделения полезного сигнала на фоне внешних акустических помех;

Сравнивая вышеперечисленные факторы, предполагается, что сочетанием корреляционного и акустического методов обнаружения утечек может компенсировать некоторые недостатки. Преимуществами данного решения является простота и удобство в эксплуатации, а также относительно высокий показатель точности.

Для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения были выделены следующие критерии:

##### 1. Технические критерии:

- удобство в эксплуатации – критерий, характеризующий соответствие требованиям потребителей;
- потребность в ресурсах памяти контроллера – критерий, характеризующий достаточный объем памяти контроллера;
- интерфейс пользователя – критерий, характеризующий свойство системы, сохранять работоспособность в течение времени;
- функциональное исполнение системы – критерий, характеризующий энергоэффективность разрабатываемой системы;
- точность вычисления результата – критерий, характеризующий уровень использования разрабатываемой системы.

## 2. Экономические критерии:

- уровень востребованности среди потребителей ПО – критерий, характеризующий необходимость эксплуатации устройства;
- цена – критерий, характеризующий стоимость системы;
- финансирование разработки ПО – критерий, характеризующий уменьшение эксплуатационных расходов предприятия за счет внедрения устройства;
- срок эксплуатации – критерий, характеризующий срок службы устройства.

Таблица 7 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Удобство в эксплуатации	0.1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
2. Потребность в ресурсах памяти контроллера	0.05	3	5	3	0,15	0,25	0,15
3. Интерфейс пользователя	0.1	5	4	5	0,5	0,4	0,5
4.Функциональное исполнение системы	0.2	5	3	1	1	0,6	0,1
5. Точность вычисления результата	0.05	5	4	5	0,25	0,2	0,25
Экономические критерии оценки эффективности							
2. Уровень востребованности среди потребителей ПО	0.1	3	3	3	0,3	0,3	0,3
3. Цена	0.1	3	5	1	0,3	0,5	0,1
4. Финансирование разработки ПО	0.2	3	2	3	0,6	0,4	0,6
5. Срок эксплуатации	0.1	5	5	3	0,5	0,5	0,3
Итого	1	33	41	27	4,1	3,65	2,8

Исходя из расчётов, сделанных выше, можно сделать вывод, что разработка имеет высокий уровень конкурентоспособности.

## 4.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в табл.8.

Таблица 8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Постановка целей и задач, получение исходных данных	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Научный руководитель, инженер
	3	Проведение патентных исследований	Научный руководитель, инженер
	4	Разработка календарного плана	Научный руководитель, инженер
Проектирование структуры ПО	5	Обсуждение литературы	Научный руководитель, инженер
	6	Проектирование структуры ПО	Научный руководитель, инженер
	7	Разработка ПО	Научный руководитель, инженер
	8	Тестирование ПО	Инженер
<i>Проведение ОКР</i>			
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	9	Оформление расчетно-пояснительной записки	Инженер
	10	Оформление графического материала	Инженер
	11	Подведение итогов	Научный руководитель, инженер

## 2.2 Разработка графика проведения научного исследования

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. В таблице 9

приведены длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе.

В таблице 11 построен календарный план-график для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике выделены различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

















Таблица 9 – График проведения научного исследования



Этап	Исполнитель	Продолжительность работ, дни			Длительность работ, чел/дн.			
					$T_{Pi}$		$T_K$	
		$t_{min}$	$t_{max}$	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
Постановка задачи	НР	3	5	3,8	4,56	–	5,53	–
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	2	4	2,8	0,34	3,36	0,41	4,07
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	4	6	4,8	4,03	5,04	4,88	6,11
Разработка календарного плана	НР, И	2	4	2,8	0,67	3,36	0,81	4,07
Обсуждение литературы	НР, И	2	4	2,8	1,01	3,36	1,22	4,07
Проектирование структуры ПО	НР, И	15	20	17	20,4	14,28	24,3	17,30
Разработка ПО	НР, И	12	15	13,2	7,92	15,84	9,60	19,19
Тестирование и отладка ПО	И	6	10	7,6	-	9,12	-	11,05
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	6	9	7,2	-	8,64	-	10,47
Оформление графического материала	И	2	5	3,2	-	3,84	-	4,65
Подведение итогов	НР, И	2	3	2,4	1,72	2,88	2,08	3,49
<b>Итого:</b>				67,6	40,6	69,72	49,3	84,47

Таблица 10 – Календарный план проведения научного исследования

Этап	Длительность работ	Начало	Окончание
Постановка задачи (НР)	5,53 дней	22.01.18	29.01.18
Разработка и утверждение ТЗ (НР)	4,1 дней	29.01.18	04.02.18
Разработка и утверждение ТЗ (И)	4,07 дней	29.01.18	04.02.18
Подбор и изучение материалов по тематике (НР)	4,88 дней	04.02.18	11.02.18
Подбор и изучение материалов по тематике (И)	6,11 дней	04.02.18	12.02.18
Разработка календарного плана (НР)	0,81 дней	12.02.18	15.02.18
Разработка календарного плана (И)	4,07 дней	12.02.18	18.02.18
Обсуждение литературы (НР)	1,22 дней	18.02.18	22.02.18
Обсуждение литературы (И)	4,07 дней	18.02.18	24.02.18
Проектирование структуры ПО (НР)	24,72 дней	24.02.18	30.03.18
Проектирование структуры ПО (И)	17,03 дней	24.02.18	18.03.18
Разработка ПО (НР)	9,6 дней	30.03.18	13.04.18
Разработка ПО (И)	19,19 дней	30.03.18	26.04.18
Тестирование и отладка ПО И, НР)	11,05 дней	26.04.18	11.05.18
Оформление расчетно-пояснительной записки (И)	10,47 дней	11.05.18	26.05.18
Оформление графического материала (И)	4,65 дней	01.06.18	05.06.18
Подведение итогов (НР)	2,08 дней	05.06.18	7.06.18
Подведение итогов (И)	3,49 дней	05.06.18	7.06.18

Таблица 11 – Календарный план-график проведения научного исследования

№ рабо т	Вид работ	Исполнител и	Т <sub>к</sub> , кал.дн .	Продолжительность выполнения работ													
				Феврал ь			Март			Апрель			Май			Июн ь	
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
2	Постановка задачи	НР	5														
3	Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, инженер	4	 													
4	Подбор и изучение материалов по тематике	Инженер	6														
5	Разработка календарного плана	НР, инженер	4	 													
6	Обсуждение литературы	Инженер	2														
7	Проектирование структуры ПО	Инженер	6														
8	Разработка ПО	Инженер	9														
9	Тестирование и отладка ПО	Инженер	11				 										
11	Оформление графического материала	Инженер	5														
12	Оформление расчетно-пояснительной записки	НР, инженер	10				 										
14	Подведение итогов	Инженер	3									 					

 – Руководитель     – Инженер

#### 4.3.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

При планировании бюджета НТИ обеспечивает полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. Затраты на проектирование группируются в соответствии с их экономическим содержанием по следующим элементам:

- материальные затраты;
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

#### 4.3.4.1 Расчет материальных затрат НТИ

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта. Материальные затраты, необходимые для данной разработки, отображены в таблице 12.

Таблица 12 – Материальные затраты

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Количество	Сумма, руб.
Блокнот	40	2 шт.	80
Бумага для принтера формата А4	150	2 уп.	300
Ручка	10	4 шт.	40
Карандаш	10	2 шт.	20
<b>Итого:</b>			<b>440</b>

Таким образом, расходы на материалы составили 440 рублей.

#### 4.3.4.2 Расчёт затрат на электроэнергию

Данная статья учитывает затраты на электроэнергию, которая потребляется всем оборудованием в течение работы над проектом. Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot Ц_{\text{э}},$$

где  $P_{\text{об}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$Ц_{\text{э}}$  – тариф на 1 кВт·час ( $Ц_{\text{э}} = 5,8$  руб/кВт·ч);

$t_{\text{об}}$  – время работы оборудования, час.

Время работы оборудования определяется по формуле:

$$t_{об} = T_{рд} * Kt,$$

где  $Kt \in 1$  – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к  $T_{рд}$ , определяется исполнителем самостоятельно. В ряде случаев возможно определение  $t_{об}$  путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Для выполнения работ студентом использовался персональный компьютер, принтер. Затраты на потребленную оборудованием электроэнергию сведены в таблицу 13.

Таблица 13 – Затраты на электроэнергию

Наименование оборудования	Мощность оборудования, кВт	$K_t$	Время работы оборудования, ч.	Затраты на электроэнергию, руб.
Персональный компьютер	0,04	0,9	650	1035
Принтер	0,02	0,005	240	24
<b>Итого</b>				<b>1059</b>

#### 4.3.4.3 Расчет затрат на специальное оборудование для экспериментальных работ

В данной статье включены все затраты на специальное оборудование, необходимое для проведения работ в рамках данной диссертации. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене. Расчет затрат по приобретению спецоборудования представлен в таблице 14.

Таблица 14 – Материальные затраты на приобретение спецоборудования для научных работ

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Количество	Сумма, руб.
Arduino UNO (комплект)	1500	1 шт.	1500
Плата расширения MusicShieldVS1053b	2000	1 шт.	2000



Затраты на доставку	250	1 шт.	250
Вибропреобразователь ДН-4-M1	9000	2 шт.	18000
Аккумулятор Power Shield	1600	1 шт.	1600
<b>Итого:</b>			<b>23350</b>

В итоге расходы на спецоборудование для научных работ составили 23350 рублей.

#### **6.3.4.3 Основная и дополнительная заработная плата исполнителей темы**

В данной статье включена основная заработная плата научного руководителя и инженера. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп},$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ( $Z_{осн}$ ) работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб},$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата, одного работника;

$T_{раб}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн;

$Z_{доп}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{дн}} = (З_{\text{м}} \cdot M) / F_{\text{д}}$$

Среднедневная заработная плата инженера рассчитывается по фор

Расчеты затрат на основную заработную плату приведены в таблице 6.9. При расчете учитывалось, что научный руководитель работает в ТПУ в должности профессора консультанта, оклад которого составляет 36800 руб. Инженер является магистрантом ТПУ с окладом в 9500 руб. Затраты времени на выполнение работы по каждому исполнителю брались из таблицы 15. Также был принят во внимание районный коэффициент по Томской области, равный  $K_{PK} = 1,3$ .

Таблица 15 – Затраты на основную заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./день	Затраты времени, дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	36800	1415,38	10	1,3	18400
И	9500	431,82	55	1,3	30875,13
<b>Итого:</b>					49275,13

Среднедневная заработная плата научного руководителя рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{дн}} = \frac{36800}{26} = 1415,38 \text{ руб./день.}$$

Среднедневная заработная плата инженера рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{дн}} = \frac{9500}{22} = 431,82 \text{ руб./день.}$$

Основная заработная плата ( $З_{\text{осн}}$ ) научного руководителя с учетом районного коэффициента составляет:

$$З_{\text{осн1}} = 1414,38 \cdot 10 \cdot 1,3 = 18400 \text{ руб.}$$

Основная заработная плата ( $З_{\text{осн}}$ ) инженера с учетом районного коэффициента составляет:

$$З_{\text{осн2}} = 431,82 \cdot 55 \cdot 1,3 = 30875 \text{ руб.}$$

Таким образом, затраты на основную заработную плату составили:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{осн1}} + З_{\text{осн2}} = 18400 + 30875,13 = 49275,13 \text{ руб.}$$

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$З_{\text{доп}} = (1 + k_{\text{доп}}) \cdot З_{\text{осн}},$$

где  $k_{\text{доп}}$  - коэффициент дополнительной заработной платы;

Примем коэффициент дополнительной заработной платы равным 0,15 для научного руководителя и 0,1 для инженера. Результаты расчёта основной и дополнительной заработной платы исполнителей научного исследования представлены в таблице 16.

#### 4.3.4.4 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Расчеты отчислений во внебюджетные фонды представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
НР	18400	2760
И	30875,13	3087,5
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	$k_{\text{внеб}} = 27,1\%$	
<b>Итого:</b>	<b>14938,2</b>	

Итого отчисления во внебюджетные фонды составили:

$$З_{\text{внеб}} = 55122,5 \cdot 0,271 \cdot 100\% = 14938,2 \text{ руб.}$$

#### 4.3.4.5 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$З_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 4) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (14)$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

$$З_{\text{накл}} = (49275,13 + 14938,2 + 23350 + 440) \cdot 0,16 = 15408,64.$$

#### 4.3.4.6 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведено в таблице 17.

Таблица 17 – Расчёт бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	440
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	23350
3. Затраты по основной и дополнительной заработной плате исполнителей темы	55122,5
4. Расчет затрат на электроэнергию	1059
5. Отчисления во внебюджетные фонды	15408,64
6. Накладные расходы	13827
<b>Бюджет затрат НТИ</b>	<b>109207,14</b>

#### 4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в таблице 18.

Таблица 18 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ Объект исслед.	Весовой коэффициент параметра	Разработка	Исп.1	Исп.2
1. Уровень новизны	0,3	5	5	5
2. Теоретический уровень	0,3	4	4	5
3. Возможность реализации	0,4	5	4	4
ИТОГО	1	4,7	4,3	4,6

$$I_p = 5 * 0,3 + 4 * 0,3 + 5 * 0,4 = 5;$$

$$I_{p-исп1} = 5 * 0,3 + 4 * 0,3 + 4 * 0,4 = 4,3;$$

$$I_{p-исп2} = 5 * 0,3 + 5 * 0,3 + 4 * 0,4 = 4,6.$$

Интегральный финансовый показатель разработки определяется:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}},$$

где  $I_{\Phi}^p$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{max}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат

разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Для исполнения №1 интегральный финансовый показатель разработки:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_p}{\Phi_{max}} = \frac{100245}{125500} = 0,53.$$

Для аналогов соответственно:

$$I_{\Phi}^{a1} = \frac{\Phi_{a1}}{\Phi_{max}} = \frac{175421}{189150} = 0,92 ; I_{\Phi}^{a2} = \frac{\Phi_{a2}}{\Phi_{max}} = \frac{189150}{189150} = 1.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ( $I_{\Phi}^p$ ) и аналога ( $I_{\Phi}^{ai}$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\Phi}^p = \frac{I_m^p}{I_{\Phi}^p}, I_{\Phi}^{ai} = \frac{I_m^{ai}}{I_{\Phi}^{ai}}.$$

В результате:

$$I_{\Phi}^p = \frac{I_m^p}{I_{\Phi}^p} = \frac{4,7}{0,79} = 8,86;$$

$$I_{\Phi}^{a1} = \frac{I_m^{a1}}{I_{\Phi}^{a1}} = \frac{4,3}{0,75} = 5,73;$$

$$I_{\Phi}^{a2} = \frac{I_m^{a2}}{I_{\Phi}^{a2}} = \frac{4,6}{0,81} = 4,6.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта.

Сравнительная эффективность проекта:

$$\Xi_{cp} = \frac{I_{\Phi}^p}{I_{\Phi}^{ai}}.$$

Результат вычисления сравнительной эффективности проекта представлен в таблице 17.

Таблица 17 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разр.	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,53	0,75	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,7	4,3	4,6
3	Интегральный показатель эффективности	8,86	5,73	4,6
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	1,55	1,93

Таким образом, основываясь на определении ресурсосберегающей, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности проектирования можно сделать вывод о преимущественном исполнении № 1 над аналогами. Все 3 исполнения с финансовой точки зрения одинаково эффективны.

## Заключение

В работе предложено простое аппаратное решение для приёма, хранения и передачи в цифровом виде вибросигналов на базе микроконтроллерной платформы Arduino и на базе платформы Raspberry Pi В. Разработанное решение предполагается для применения в качестве учебного стенда, знакомящего студентов с принципами пассивной локации. Работоспособность устройства подтверждена, в ходе экспериментальных исследований определения локации объекта, являющегося источником сигнала.

В ходе работы исследованы области применения алгоритмов цифровой обработки сигналов, описаны существующие вычислительные устройства обработки сигналов и рассмотрено необходимое программно-аппаратное обеспечение для осуществления виброакустических измерений.

В ходе работы рассмотрены алгоритмы оценки времени запаздывания прихода сигнала с помощью корреляционного и регрессионного способа, выполнен сравнительный анализ результатов. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что корреляционный метод наиболее эффективен при реализации алгоритма с зашумленными сигналами, однако регрессионный метод менее требователен к вычислительным мощностям ввиду упрощенного алгоритма.

В дальнейшем, в качестве универсального устройства ввода, дискретизации, хранения и передачи данных, а также реализации вычислительных алгоритмов будет использован одноплатный компьютер DSP Raspberry Pi в комплектации с дисплеем и пультом управления, что позволит выполнять визуализацию результатов на LCD дисплее, непосредственно средствами портативного устройства.



### Список публикаций студента

1. Марукян В. М. , Фаерман В. А. Разработка устройства для приема вибросигналов на базе платформы Arduino // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. [Электронный ресурс] / науч. ред. А.И. Громыко; отв. за вып. А.А. Левицкий. – Электрон. дан. (26 Мб). – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. С. 166–170.
2. Фаерман В. А. Применение фазочастотного анализа для повышения достоверности локации утечек корреляционным методом / В. А. Фаерман, В. М. Марукян // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 04-07 декабря 2017 г., г. Томск. — Томск : Изд-во ТПУ, 2017. — [С. 59-60].
3. Фаерман В. А. , Марукян В. М. Постановка и исследование задачи разработки программной части течепоискового комплекса // Научная сессия ТУСУР-2017: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 55-летию ТУСУРа. В 8 частях, Томск, 10-12 Мая 2017. - Томск: В-Спектр, 2017 - Т. 4 - С. 23-25
4. Марукян В. М. , Фаерман В. А. Характеристики и особенности корреляционных течепоисковых комплексов // Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность : сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции. В 3 т., Томск, 23-27 Мая 2016. - Томск: ТПУ, 2016 - Т. 1 - С. 206-210
5. Марукян В. М. , Фаерман В. А. Экспериментальная оценка точности локации течей прототипом корреляционно- акустического течепоискового комплекса // Проблемы геологии и освоения недр: труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета, Томск, 4-8 Апреля 2016. - Томск: Изд-во ТПУ, 2016 - Т. 2 - С. 932-933

6. Марукян В. М. , Фаерман В. А. Частотно-временной корреляционный анализ периодических последовательностей импульсов // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 9-13 Ноября 2015. - Томск: ТПУ, 2016 - Т. 1 - С. 172-173
7. Фаерман В. А. , Марукян В. М. Генерация периодических сигналов с заданной локализацией спектра в ППП Mathcad // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: сборник трудов XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 25-26 Марта 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - С. 28-29

### Список использованных источников

1. Бранцевич П.Ю., Костюк С.Ф., Базылев Е.Н., Базаревский В.Э. Методика применения программных средств обработки вибросигналов при оценке технического состояния механизмов и агрегатов // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния. – 2013 г. – Минск. – С. 102-103
2. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание. : Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 992 с.
3. Крюков В.В. Информационно-измерительные системы. Учебное пособие. – Владивосток: ВГУЭС, 2000. - 102 с
4. Научно-техническое руководства по цифровой обработке сигналов [Электронный ресурс] // Научно-технический центр по электронным компонентам АВТЭКС. Режим доступа: [http://www.autex.spb.su/download/dsp/dsp\\_guide/ch01.pdf](http://www.autex.spb.su/download/dsp/dsp_guide/ch01.pdf), свободный (посл. обращение 16.05.18);
5. Оппенгейм Аллан В. (ред.). Применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1980. - 552 с.
6. Системы вибрационного контроля и диагностики, [Электронный ресурс] // Информационный сайт «Сумма Технологий». Режим доступа: <http://www.summatechnology.ru/solutions/sistemy-vibratsionnogo-kontrolya-i-diagnostiki/>, свободный (посл. обращение 18.05.18);
7. Информационно-измерительная техника и технологии / В. И. Калашников, С.В. Нефедов, А.Б. Путилин и др.; под ред. Г.Г. Ранеева. — М. Высшая школа, 2002. — 454 с.
8. Ключев А.О., Ковязина Д.Р., Петров Е.В., Платунов А.Е. Интерфейсы периферийных устройств. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 290 с.
9. Матвеев Ю.Н., Симончик К.К., Тропченко А.Ю., Хитров М.В. Цифровая обработка сигналов Учебное пособие по дисциплине "Цифровая обработка сигналов". – СПб: СПбНИУ ИТМО, 2013. – 166 с.

10. Мячин М. Л. Цифровая обработка сигналов. Курс лекций для студентов специальности «Прикладная математика» – на правах рукописи, Ярославский государственный университет, 1996 – 2004.
11. Ричард Лайонс Цифровая обработка сигналов. — 2-е. — М: Бином-Пресс, 2006. — 656 с.
12. Куприянов М. С. Матюшкин Б. Д. Цифровая обработка сигналов. — 2-е. — СПб: Политехника, 2000. — 592 с.
13. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. — 2-е. — СПб: Питер, 2006. — с. 751
14. Микропроцессорные средства и системы: курс лекций / Под ред. Ю. В. Савченко. — М.: МИЭТ, 2013. — 288 с.: ил.
15. Солонина, А. И. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов [Текст]/ А . И . Солонина, Д . А . Улахович, Л . А . Яковлев. СПб.: БХВ-Петербург, 2001.
16. Лучкин А.В. Архитектура микропроцессора — Структура и общая характеристика // Молодежный научный форум: Технические и математические науки: электр. сб. ст. по мат. XIX междунар. студ. науч.-практ. конф. № 12(19). Режим доступа: [https://nauchforum.ru/archive/MNF\\_tech/12\(19\).pdf](https://nauchforum.ru/archive/MNF_tech/12(19).pdf), свободный (посл. обращение: 24.05.2018)
17. Глинченко, А. С. Цифровая обработка сигналов. Версия 1.0 [Электронный ресурс] : курс лекций / А. С. Глинченко. — Электрон. дан. (3 Мб). — Красноярск: ИПК СФУ, 2008
18. Kavitha Jain – System-on-Chip vs Single-Board Computer: A Comparison Guide [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.semiconductorstore.com/blog/2015/System-on-Chip-vs-Single-Board-Computer-A-Comparison-Guide/689>, свободный (посл. обращение 18.05.18);

19. Романов О.В. Что выбрать — одноплатный компьютер или процессорный модуль с ARM или x86 процессором? // Приложение к журналу Control Engineering Россия IoT Апрель 2017.
20. Mayank Prasad. Introduction to Single Board Computing [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://maxembedded.com/2013/07/introduction-to-single-board-computing/>, свободный (посл. обращение 18.05.18);
21. Andrew K. Dennis. Raspberry Pi Home Automation with Arduino, Birmingham – Mumbai, Packt Publishing, 2013
22. Климентьев К.Е. Системы реального времени: обзорный курс лекций/ К.Е. Климентьев. - Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2008. – 45 с.
23. Никифоров В. В., Гуцалов Н. В. Методы измерения реактивности систем реального времени // Программные продукты и системы. 2001. №4. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-izmereniya-reaktivnosti-sistem-realnogo-vremeni>, свободный (посл. обращения: 26.05.2018).
24. Бобков П. Согласование логических уровней. [Электронный ресурс] // Информационный сайт «Chipenable». Режим доступа: <http://chipenable.ru/index.php/how-connection/item/91-soglasovanie-logicheskikh-urovney.html>, свободный (посл. обращение 18.05.18);
25. Преобразователи уровня логических сигналов, часть 1. Однонаправленная передача. [Электронный ресурс] // Блог им. Catethysis. Режим доступа: <http://catethysis.ru/logic-level-converters-1/>, свободный (посл. обращение 18.05.18);
26. Василевский Э. Что такое графический процессор и как он работает. [Электронный ресурс] // Информационный сайт «AndroidInsider.ru». Режим доступа: <https://androidinsider.ru/polezno-znat/chto-takoe-graficheskiy-processor-i-kak-on-rabotaet.html>, свободный (посл. обращение 20.05.18);
27. Дж. Ли, Б. Уэр. Трёхмерная графика и анимация. — 2-е изд. — М.: Вильямс, 2002. — 640 с.
28. Богачев К.Ю. Архитектура процессоров — МГУ им. Ломоносова, 1999. — 127 с.

29. Учебник по информатике (курс лекций) [Электронный ресурс] // Учебно-методический центр кафедры информационных технологий. Режим доступа: [http://dit.isuct.ru/IVT/sitanov/Literatura/InformLes\\_3.html](http://dit.isuct.ru/IVT/sitanov/Literatura/InformLes_3.html), свободный (посл. обращение 20.05.18)
30. Микроконтроллеры: краткий обзор. [Электронный ресурс] // Информационный сайт «Мой робот». Режим доступа: [https://myrobot.ru/stepbystep/mc\\_meet.php](https://myrobot.ru/stepbystep/mc_meet.php), свободный (посл. обращение 26.05.18).
31. Каневский И.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. пособие / И. Н. Каневский, Е. Н. Сальникова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007 – 243 с.
32. Трофимов В.Б., Кулаков С.М. Интеллектуальные автоматизированные системы управления технологическими объектами. – Вологда: Инфраинженерия, 2016. – 232 с.
33. Arduino Mega. [Электронный ресурс] // Сайт компании-дистрибьютора ООО «Амперка». – Режим доступа: <http://amperka.ru/product/arduino-mega-2560>, свободный (посл. обращение 21.02.2018 г.);
34. Datasheet VS1053b (VLSI Solution Oy) // Информационный сайт компании производителя Seeed Studio. Режим доступа: <http://wiki.seeedstudio.com/images/9/9a/Vs1053.pdf> (посл. обращение 26.02.18).
35. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: учебное пособие. – 2-ое изд. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. – 378 с.
36. Овчинников А.Л., Лапшин Б.М., Чекалин А.С., Евсиков А.С. Опыт применения течеискателя ТАК-2005 в городском трубопроводном хозяйстве // Известия Томского политехнического университета, 2008. -т. 312 -№ 2 - с. 196-202.
37. Приложение к свидетельству об утверждении типа средств измерения. Описание типа средства измерений. Преобразователи пьезоэлектрические

виброизмерительные ДН-4-М1. – № 35011-07 в Госреестре средств измерения; дата регистр. 25.02.2007. - 3 с.

38. Совместная работа утилит [Электронный ресурс] / Arduino and Visual Studio. – Режим доступа: <http://www.visualmicro.com/page/User-Guide.aspx?doc=ru/How-The-Tools-Play-Together.html>, свободный (посл. обращение: 23.05.2018 г.)
39. Установка операционной системы на Raspberry Pi, [Электронный ресурс] // Информационный сайт «Все об Ардуино». Режим доступа: <https://arduinomaster.ru/raspberry-pi/operatsionnye-sistemy-raspberry-pi/>, свободный (посл. обращение 22.05.2018 г.).
40. Виды сигналов: аналоговый, цифровой, дискретный. [Электронный ресурс] // «ФБ.ру». Режим доступа: <http://fb.ru/article/282258/vidyi-signalov-analogovyy-tsifrovoy-diskretnyy>, свободный (посл. обращение 21.05.2018 г.).
41. Петин В. А. Проекты с использованием контроллера Arduino. — СПб.: БХВ-Петербург, 2014. — 400 с.: ил.
42. Кречетов А. Д. Оценка параметров сигнала: Учеб. пособие / ЛЭТИ (ЛИАП). Л., 1980.
43. Барков А.В., Баркова Н.А., Грищенко Д.В. Идентификация состояния механизмов с узлами вращения Методика МВ.03.7826741252./23.12.2011 НОУ «Северо-западный учебный центр» Санкт-Петербург 2011, 80 с.
44. Устройства ввода/вывода [Электронный ресурс] // Энциклопедия АСУ ТП. Режим доступа: [http://www.bookasutp.ru/Chapter6\\_3.aspx](http://www.bookasutp.ru/Chapter6_3.aspx), свободный (посл. обращение 29.05.2018 г.).
45. ГОСТ Р 51841-2001 Программируемые контроллеры. Общие технические требования и методы испытаний.
46. Лепеш, Г.В. Современные методы и средства диагностики оборудования инженерных систем зданий и сооружений/Г.В. Лепеш // Техно-технологические проблемы сервиса. -2015. - № 4(34) – С. 3 – 8.